



Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France

Rapport final

Février 2010

Etude réalisée pour le compte de l'Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, et de France Agrimer par BIO Intelligence Service

Coordination technique : – Service Bioressources

Direction Production et Energies Durables (DEPD) - ADEME

▪ Remerciements - Avertissement

L'ADEME remercie vivement les membres du comité technique et du comité de pilotage pour leur participation, leurs apports à l'étude, la relecture des documents et leurs commentaires et suggestions. Les nombreux échanges ont permis de mettre en évidence différents points de vue et interprétations possibles des études disponibles. Ils ont été riches et essentiels à l'élaboration du rapport final de l'étude.

Malgré la rigueur apportée à la collecte des données, des erreurs, omissions ou inexactitudes peuvent s'insérer dans cette étude. Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs. Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées aux membres du comité technique.

ADEME	France Ester / AKIOLIS	FranceAgriMer (ex ONIGC)
AGROGENERATION	IFP	PROLEA
ARVALIS	INEOS	PSA
BENP-TEREOS	INRA	RAC-F
BIOCAR	INVIVO	RENAULT
CETIOM	ITB	SARIA
CIRAD	LYONDELLBASELL	SIFCO
CRISTAL-UNION	MAAP	TOTAL
FNE	MEEDDM	VEOLIA ENVIRONNEMENT

- Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

Sommaire

1. Glossaire	15
2. Contexte et objectifs de l'étude.....	17
2.1. Contexte de l'étude	17
2.2. Commanditaires de l'étude	18
3. Principes généraux de cette ACV	19
3.1. Introduction	19
3.2. Une organisation en comités	19
3.3. Présentation des filières étudiées.....	19
3.4. Indicateurs d'impacts environnementaux et modèles de caractérisation	20
3.4.1. Consommation d'énergie non renouvelable	20
3.4.2. Potentiel d'émission de gaz à effet de serre	21
3.4.3. Potentiel d'eutrophisation	21
3.4.4. Précurseurs d'ozone (aussi appelé : Formation de photo-oxydants)	23
3.4.5. Potentiel de toxicité humaine	23
3.5. Unité fonctionnelle et frontières du système	24
3.5.1. Unité fonctionnelle	24
3.5.2. Frontières et étapes du système.....	28
3.6. Rappel des principes de calcul d'une analyse de cycle de vie	30
3.7. Règles d'allocation.....	31
3.7.1. Filières biocarburants : généralités.....	31
3.7.2. Détail des allocations appliquées aux biocarburants.....	31
3.7.3. Allocations appliquées aux filières fossiles	35
3.7.4. Cas particulier des 3 catégories d'impact non étudiées dans le référentiel méthodologique.....	35
4. Modélisation des filières	37
4.1. Etapes agricoles	37
4.1.1. Données utilisées et représentativité	37

4.1.2.	Hypothèses de modélisations	39
4.2.	Etapes de production du biocarburant.....	49
4.2.1.	Représentativité des procédés modélisés	49
4.2.2.	Sources de données	49
4.2.3.	Hypothèses principales	52
4.2.4.	Scénarii prospectifs des filières à 5 ans.....	55
4.3.	Filière pétrolière	56
4.3.1.	Phase d'extraction	56
4.3.2.	Elaboration des inventaires d'émission des raffineries	56
4.3.3.	Rappel : principe retenu dans le référentiel	56
4.3.4.	Scénarii prospectifs à 5 ans.....	58
4.4.	Etapes ETBE	58
4.4.1.	Limitation liée aux frontières du système.....	59
4.4.2.	Source de données.....	59
4.4.3.	Quantification de la charge amont de l'isobutène.....	59
4.4.4.	Etape de fabrication de l'ETBE	60
4.5.	Etapes véhicule.....	61
4.5.1.	Carburants modélisés	61
4.5.2.	Impact du choix de véhicule et de sa motorisation	62
4.5.3.	Impact du choix du cycle de mesure d'émission.....	68
4.5.4.	Modifications nécessaires du véhicule	70
4.5.5.	Emissions de dioxyde de carbone biogénique	71
4.6.	Filière graisses animales et huiles végétales usagées.....	71
4.6.1.	Quelle charge amont pour ces matières ?	72
4.6.2.	Modélisation des étapes à prendre en considération	75
4.7.	Changement d'affectation des sols	77
4.7.1.	Principe :	77
4.7.2.	Rappel sur les recommandations du référentiel méthodologique :	77

4.7.3.	Changement d'affectation direct	79
4.7.4.	Changements d'affectation indirects	81
5.	Présentation synthétique des filières.....	84
5.1.	Filières fossiles de référence	85
5.2.	Filière EMHV de colza :	88
5.3.	Filière EMHV de tournesol.....	91
5.4.	Filière EMHV de soja	93
5.5.	Filière EMHV de palme.....	96
5.6.	Filière huile végétale pure (HVP)	99
5.7.	Filière ester méthylique d'huiles alimentaires usagées (EMHAU).....	101
5.8.	Filière ester méthylique de graisses animales (EMGA).....	104
5.9.	Filière éthanol de blé	106
5.10.	Filière éthanol de maïs.....	109
5.11.	Filière éthanol de betterave	112
5.12.	Filière éthanol de canne à sucre	116
5.13.	Etape de fabrication de l'ETBE.....	119
6.	Présentation des résultats.....	121
6.1.	Filières fossiles de références	123
6.1.1.	Résultats généraux.....	123
6.1.2.	Résultats prospectifs	123
6.1.3.	Mise en perspective à travers les valeurs de deux autres études	124
6.2.	Résultats globaux par km parcouru	126
6.2.1.	Sur carburants réels	126
6.2.2.	Résultats par km parcouru, ramenés au seul biocarburant du mélange	127
6.3.	Résultats détaillés par MJ de carburant	129
6.3.1.	EMHV de colza	129
6.3.2.	EMHV de tournesol	132
6.3.3.	EMHV de soja	135

6.3.4.	EMHV de palme	139
6.3.5.	HVP100.....	143
6.3.6.	EMHAU.....	147
6.3.7.	EMGA	150
6.3.8.	Ethanol de blé	152
6.3.9.	Ethanol de maïs.....	155
6.3.10.	Ethanol de betterave	157
6.3.11.	Ethanol de canne à sucre	160
6.3.12.	ETBE	164
7. Analyse des résultats		167
7.1.1.	Sur les consommations d'énergie non renouvelable :.....	167
7.1.2.	Sur le potentiel d'émissions de Gaz à Effet de Serre :	168
7.1.3.	Sur les émissions impactant l'indicateur potentiel de « toxicité humaine »	172
7.1.4.	Sur le potentiel d'émissions photo-oxydantes.....	182
7.1.5.	Sur le potentiel d'émissions eutrophisantes	190
8. Autres analyses.....		195
8.1. Analyse de sensibilité sur les méthodes d'allocations mises en place.....		195
8.1.1.	Allocation massique	196
8.1.2.	Allocation économique	197
8.1.3.	Approche par substitution	198
8.1.4.	Synthèse	201
8.2. Charge allouée aux coproduits alimentaires		201
8.3. Effets du niveau de mélange (E85 et B30)		203
8.4. Analyse de sensibilité sur la réduction d'émission CO₂ véhicule des éthanol.....		205
8.5. Analyse de sensibilité sur les zones géographiques et pondération entre régions		206
8.6. Le changement d'affectation des sols		206
8.6.1.	Résultats.....	207
8.6.2.	Discussion sur ces éléments.....	211

8.7. Evolutions à 5 ans de ces bilans	211
8.8. Effets d'incorporation	213
8.8.1. Description des simulations réalisées	213
8.8.2. Premières conclusions potentielles de ces simulations	214
8.8.3. Ordre de grandeur potentiel de ces effets.....	215
9. Analyse comparative.....	217
9.1. Synthèses des comparaison entre études	217
9.1.1. Sur l'indicateur consommation d'énergie non renouvelable.....	217
9.1.2. Sur l'indicateur gaz à effet de serre	217
9.1.3. Par rapport à la directive 2009/28/CE	218
9.2. Analyses des écarts	220
9.2.1. Valeurs calculées pour les filières de référence.....	220
9.2.2. Regard sur les données d'entrée	220
9.2.3. Les inventaires utilisés	221
9.2.4. La méthodologie choisie	223
10. Synthèse des résultats	227
10.1. Synthèse sur la consommation d'énergie non renouvelable	227
10.1.1. Sur le niveau des écarts	227
10.1.2. Sources et étapes justifiant ces écarts.....	228
10.1.3. Quel est le niveau de précision atteint ?.....	228
10.1.4. Que peut-on en conclure ?	228
10.2. Synthèse sur les émissions de gaz à effet de serre.....	228
10.2.1. Sur le niveau des écarts	228
10.2.2. Sources et étapes justifiant ces écarts.....	229
10.2.3. Quel est le niveau de précision atteint ?.....	229
10.2.4. Que peut-on en conclure ?	230
10.3. Synthèse sur le potentiel d'oxydation photochimique.....	230
10.3.1. Sur le niveau des écarts	230
10.3.2. Sources et étapes justifiant ces écarts.....	231

10.3.3.	Quel est le niveau de précision atteint ?.....	231
10.3.4.	Que peut-on en conclure ?	232
10.4.	Synthèse sur le potentiel de toxicité humaine.....	232
10.4.1.	Sur le niveau des écarts	232
10.4.2.	Sources et étapes justifiant ces écarts.....	232
10.4.3.	Quel est le niveau de précision atteint ?.....	233
10.4.4.	Que peut-on en conclure ?	233
10.5.	Synthèse sur le potentiel d'eutrophisation	233
10.5.1.	Sur le niveau des écarts	233
10.5.2.	Sources et étapes justifiant ces écarts.....	234
10.5.3.	Quel est le niveau de précision atteint ?.....	234
10.5.4.	Que peut-on en conclure ?	234
10.6.	Conclusion générale : perspectives	234
10.6.1.	Comparaison avec d'autres études.....	234
10.6.2.	Spécificités de cette étude	235
10.6.3.	Pistes de travail à poursuivre	235
10.6.4.	Les changements d'affectation des sols.....	236
10.6.5.	Sur l'utilisation de cette étude.....	236

Tableaux

TABLEAU 1 : VALEUR ENERGETIQUE DES RESSOURCES FOSSILES ET NUCLEAIRES.....	21
TABLEAU 2 : POUVOIR DE RECHAUFFEMENT DES PRINCIPAUX GAZ CONTRIBUANT AU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE PRIS EN COMPTE DANS CETTE ETUDE	21
TABLEAU 3 : FACTEUR DE CARACTERISATION DES MOLECULES POTENTIELLEMENT EUTROPHISANTES.....	22
TABLEAU 4 : SYNTHÈSE DE LA MODELISATION POUR L'IMPACT « EUTROPHISATION ».....	22
TABLEAU 5 : LISTE INDICATIVE DE QUELQUES COMPOSES ORGANIQUES VOLATILES, A FORTE REACTIVITE	23
TABLEAU 6 : SYNTHÈSE DE LA MODELISATION « PRECURSEURS D'OZONE »	23
TABLEAU 7 : PRINCIPALES FAMILLES DE MOLECULES TOXIQUES	24
TABLEAU 8 : SYNTHÈSE DE LA MODELISATION « TOXICITE HUMAINE ».....	24
TABLEAU 9 – LIEN ENTRE LES RESULTATS PAR KM PARCOURU ET PAR MJ.....	25
TABLEAU 10 – CONSOMMATIONS D'ENERGIE AU KM PARCOURU UTILISEES DANS CETTE ETUDE.....	26
TABLEAU 11 – SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES METHODES D'ALLOCATION	31
TABLEAU 12 - DETAIL DU CALCUL D'ALLOCATION POUR L'EMHV DE TOURNESOL.....	32
TABLEAU 13 – DETAIL DU CALCUL D'ALLOCATION POUR L'ETHANOL DE BLE	32
TABLEAU 14 – RAPPEL DES EXPLICATIONS AYANT CONDUIT A CES CHOIX, TABLEAU ISSU DU REFERENTIEL 2008.....	33
TABLEAU 15 - BILANS EF ET GES DU RAFFINAGE DES CARBURANTS PETROLIERS (<i>RESULTATS DE L'ETUDE [JEC 2007]</i>)	35
TABLEAU 16 – COUVERTURE GEOGRAPHIQUE DES DONNEES UTILISEES	38
TABLEAU 17 – PARAMETRES PRIS EN COMPTE POUR CETTE ACV :	39
TABLEAU 18 – ESTIMATION DU RESIDU MOYEN D'UN PRECEDENT DE BLE	42
TABLEAU 19 – SYNTHÈSE DE LA MODELISATION DE L'AZOTE ET DES DONNEES UTILISEES.	43
TABLEAU 20 –DONNEES ISSUES D'AGRI TOX POUR LE CARBOFURAN.....	46
TABLEAU 21 –SYNTHÈSE DES FACTEURS D'EMISSION AGRICOLE	47
TABLEAU 22 –PROCEDES REPRESENTATIFS ET SOURCES DES DONNEES D'ENTREE.....	50
TABLEAU 23 – TYPES DE PARAMETRES PRIS EN COMPTE	51
TABLEAU 24- EXEMPLES DE CALCUL « REPARTITION SELON UNE ALLOCATION GES »	54
TABLEAU 25 – INVENTAIRE D'EMISSION DES SITES D'ESTERIFICATION.....	54
TABLEAU 26 – INVENTAIRE D'EMISSION D'UNE ETHANOLERIE	55
TABLEAU 27 – VALEURS D'EMISSION MJF ET GES RETENUES POUR LE RAFFINAGE	57
TABLEAU 28 – INVENTAIRE D'EMISSION DU RAFFINAGE D'UN KG DE GAZOLE ET D'ESSENCE	57
TABLEAU 29 – CALCUL DES CHARGES AMONT DE L'ISOBUTENE	60
TABLEAU 30 – INVENTAIRE DES EMISSIONS ALLOUEES A LA PRODUCTION D'UN KG D'ETBE	61
TABLEAU 31 – PART PCI DES CARBURANTS MODELISES	62
TABLEAU 32 – EMISSIONS VEHICULE, GAZOLE ET MELANGES	63
TABLEAU 33 – EMISSIONS VEHICULE, ESSENCE ET MELANGES.....	65
TABLEAU 34 – DETAIL DE LA MODELISATION DES EMISSIONS CO ₂ DES E10 ET E85	65
TABLEAU 35 – EMISSIONS VEHICULE, HVP 100%.....	67
TABLEAU 36 – SYNTHÈSE DES CHOIX REALISES	70
TABLEAU 37 – UTILISATION ACTUELLE DES GRAISSES ANIMALES	73
TABLEAU 38 – CAPACITES DE PRODUCTION EMGA ET EMHAU DANS LES PROCHAINES ANNEES	75
TABLEAU 39 – SYNTHÈSE DE LA MODELISATION DES EMGA ET EMHAU	76
TABLEAU 40 – RECAPITULATIF DES RECOMMANDATIONS POUR LE CAS DIRECT	77
TABLEAU 41 - RECAPITULATIF DES RECOMMANDATIONS POUR LE CAS INDIRECT	78
TABLEAU 42 : DONNEES DE REFERENCE UTILISEES : STOCK DE CARBONE PAR TYPE DE CULTURE	78
TABLEAU 43 : DONNEES DE REFERENCE UTILISEES : DONNEES CULTURE	78
TABLEAU 44 – VALEURS POUR LE CHANGEMENT DIRECT D'AFFECTATION DES SOLS	79
TABLEAU 45 – VALEURS POUR LE CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS INDIRECTS.....	81
TABLEAU 46 – BILANS EF ET GES DES CARBURANTS PETROLIERS - RESULTATS DE L'ETUDE [JEC 2007]	85
TABLEAU 47 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE COLZA	88
TABLEAU 48 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE COLZA.....	88
TABLEAU 49 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE TOURNESOL.....	91
TABLEAU 50 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE TOURNESOL	91
TABLEAU 51 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE SOJA	93
TABLEAU 52 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE SOJA.....	93
TABLEAU 53 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE PALME.....	96
TABLEAU 54 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE PALME	96

TABLEAU 55 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE HVP	99
TABLEAU 56 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE HVP	99
TABLEAU 57 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE EMHAU	101
TABLEAU 58 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE EMHAU	101
TABLEAU 59 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE EMGA.....	104
TABLEAU 60 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE EMGA	104
TABLEAU 61 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE BLE	106
TABLEAU 62 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE BLE.....	106
TABLEAU 63 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE MAÏS.....	109
TABLEAU 64 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE MAÏS	109
TABLEAU 65 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE BETTERAVE.....	112
TABLEAU 66 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE BETTERAVE	112
TABLEAU 67 – DETAIL DES CARACTERISTIQUES DES TROIS SOURCES D’ETHANOL BETTERAVIER	114
TABLEAU 68 – ALLOCATIONS POUR LA FILIERE CANNE A SUCRE.....	116
TABLEAU 69 – SCENARII PROSPECTIFS POUR LA FILIERE CANNE A SUCRE	116
TABLEAU 70 – SCENARII PROSPECTIFS POUR L’ETAPE ETBE	119
TABLEAU 71 - ELEMENTS DE COMPREHENSION DE LA PRESENTATION DES RESULTATS.....	122
TABLEAU 72 – INDICATEURS PAR MJ DE CARBURANT FOSSILE	123
TABLEAU 73 – INDICATEURS PAR KM PARCOURU PAR LE DIESEL EURO 4 ET EURO 5.....	123
TABLEAU 74 – INDICATEURS PAR KM PARCOURU PAR L’ESSENCE EURO 4 ET EURO 5	123
TABLEAU 75- TABLEAU COMPARATIF DE DIFFERENTES ETUDES POUR UN MJ DE DIESEL, CONSOMMATION D’ENERGIE NON RENOUVELABLE	124
TABLEAU 76 - TABLEAU COMPARATIF DE DIFFERENTES ETUDES POUR UN MJ DE DIESEL, EMISSION GES	124
TABLEAU 77 – TABLEAU COMPARATIF DE DIFFERENTES ETUDES POUR UN MJ D’ESSENCE, CONSOMMATION D’ENERGIE NON RENOUVELABLE	124
TABLEAU 78 – TABLEAU COMPARATIF DE DIFFERENTES ETUDES POUR UN MJ D’ESSENCE, EMISSION GES.....	124
TABLEAU 79 – ANALYSE DU POIDS DES INFRASTRUCTURES D’EXTRACTION DANS LE RESULTAT DE LA FILIERE ESSENCE FOSSILE.	125
TABLEAU 80 – RESULTATS COMPLETS PAR KM PARCOURU, ENSEMBLE DES FILIERES	126
TABLEAU 81 - RESULTATS COMPLETS PAR KM PARCOURU, RAMENES A LA PARTIE BIOCARBURANT DU MELANGE, ENSEMBLE DES FILIERES	127
TABLEAU 82 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU BIODIESEL DE COLZA ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT .	129
TABLEAU 83 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	131
TABLEAU 84 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU BIODIESEL DE TOURNESOL ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT	132
TABLEAU 85 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	134
TABLEAU 86 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU BIODIESEL DE SOJA ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT ...	135
TABLEAU 87 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	138
TABLEAU 88 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU BIODIESEL DE PALME ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT.	139
TABLEAU 89 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	142
TABLEAU 90 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU HVP100 ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT	143
TABLEAU 91 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU HVP100 ET DU DIESEL PAR KM PARCOURU	145
TABLEAU 92 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L’EMHAU ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT	147
TABLEAU 93 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L’EMGA ET DU DIESEL PAR MJ DE CARBURANT	150
TABLEAU 94 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L’ETHANOL DE BLE ET DE L’ESSENCE PAR MJ DE CARBURANT	152
TABLEAU 95 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	154
TABLEAU 96 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L’ETHANOL DE MAIS ET DE L’ESSENCE PAR MJ DE CARBURANT	155
TABLEAU 97 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	156
TABLEAU 98 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L’ETHANOL DE BETTERAVE ET DE L’ESSENCE PAR MJ DE CARBURANT	157
TABLEAU 99 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	159
TABLEAU 100 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L’ETHANOL DE CANNE A SUCRE ET DE L’ESSENCE PAR MJ DE CARBURANT	160
TABLEAU 101 – COMPARAISON DES EMISSIONS DE GES POUR D’AUTRES ETUDES ET METHODOLOGIES	163
TABLEAU 102 – COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIFFERENTS ETBE ET DE L’ESSENCE PAR MJ D’ETHANOL INCORPORE	164

TABLEAU 103 – RESULTATS GENERAUX DE L’ETAPE ETBE, PAR MJ D’ETHANOL.....	165
TABLEAU 104 – COMPARAISON AVEC L’ETUDE ADEME-DIREM, RESULTAT PAR MJ D’ETBE	166
TABLEAU 105 – RAPPEL SUR LES VARIABILITES DU N ₂ O	171
TABLEAU 106 – POTENTIEL D’EMISSIONS TOXIQUES PAR MJ POUR UNE ESSENCE DE REFERENCE.....	172
TABLEAU 107 – POTENTIEL D’EMISSIONS TOXIQUES PAR MJ POUR UN DIESEL DE REFERENCE	172
TABLEAU 108 – NIVEAUX D’EMISSIONS ET ETAPES CONTRIBUTRICES POUR DEUX FILIERES EMHV EN TERME DE POTENTIEL DE TOXICITE HUMAINE.....	173
TABLEAU 109 - NIVEAUX D’EMISSIONS ET ETAPES CONTRIBUTRICES POUR DEUX FILIERES ETHANOL ET UNE ETBE EN TERME DE POTENTIEL DE TOXICITE HUMAINE	173
TABLEAU 110 – RAPPEL DE L’ANNEXE 4 : INVENTAIRES D’IMPACT DE L’ETAPE RAFFINERIE.....	174
TABLEAU 111 – DETAIL DES POSTES CONTRIBUTEURS DE L’ETAPE AGRICOLE : FILIERE EMHV DE COLZA	175
TABLEAU 112 – DETAILS DE LA PHASE VEHICULE, FILIERES COLZA ET BLE.....	175
TABLEAU 113 – LISTE DES MOLECULES PRINCIPALES CONTRIBUTANT A CET INDICATEUR : EXEMPLE DE L’EMHV DE COLZA.....	176
TABLEAU 114 - LISTE DES MOLECULES PRINCIPALES CONTRIBUTANT A CET INDICATEUR : EXEMPLE DE L’ETHANOL DE BLE	177
TABLEAU 115 ANALYSE DE SENSIBILITE SUR UN ETHANOL DE BLE, VALEUR PAR MJ D’ETHANOL : PRODUITS PHYTOSANITAIRES ET ELEMENTS TRACES	178
TABLEAU 116 - ANALYSE DE SENSIBILITE SUR UN ETHANOL DE BLE, VALEUR PAR MJ D’ETHANOL : FACTEUR DE RISQUE HAP	179
TABLEAU 117 – QUELLE IMPORTANCE DONNER A CET ECART ? EXEMPLE DE COMPARAISONS DIRECTES.....	180
TABLEAU 118 – QUELLE IMPORTANCE DONNER A CET ECART ? EXEMPLE DE COMPARAISONS INDIRECTES.....	181
TABLEAU 119 – POTENTIEL D’EMISSIONS PHOTO-OXYDANTES PAR MJ POUR UN DIESEL DE REFERENCE	182
TABLEAU 120 – POTENTIEL D’EMISSIONS PHOTO-OXYDANTES PAR MJ POUR UNE ESSENCE DE REFERENCE.....	182
TABLEAU 121 – RAPPEL DES RESULTATS POUR L’INDICATEUR POTENTIEL D’OXYDATION PHOTOCHIMIQUE : EMHV	183
TABLEAU 122 - RAPPEL DES RESULTATS POUR L’INDICATEUR D’OXYDATION PHOTOCHIMIQUE : ETHANOLS ET ETBE	183
TABLEAU 123 – RAPPEL DES INVENTAIRES POUR UN KG DE PRODUIT.....	184
TABLEAU 124 – ECART SUR L’INDICATEUR D’OXYDATION PHOTOCHIMIQUE PAR KM PARCOURU, POUR 3 ETHANOLS.....	184
TABLEAU 125 - DETAIL DES FLUX CONTRIBUTEURS, OXYDATION PHOTOCHIMIQUE : FILIERE COLZA	185
TABLEAU 126 – DETAIL DES FLUX CONTRIBUTEURS, OXYDATION PHOTOCHIMIQUE : E10 DE BLE, SOUS FORME ETBE	185
TABLEAU 127 – DETAIL DES FLUX CONTRIBUTEURS, OXYDATION PHOTOCHIMIQUE : E85 DE BETTERAVE	186
TABLEAU 128 -ANALYSE DE SENSIBILITE : TEST SUR LES EMISSIONS PHOTO-OXYDANTES DES SITES D’ESTERIFICATION.....	187
TABLEAU 129 - EMHV DE COLZA : RESULTATS DE L’ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE POTENTIEL D’OXYDATION PHOTOCHIMIQUE DES EMISSIONS DES SITES D’ESTERIFICATION	187
TABLEAU 130 – ANALYSE DE SENSIBILITE : TESTS SUR LES EMISSIONS D’ETHANOLERIE	188
TABLEAU 131 - RESULTAT ETHANOL DE BLE (PAR MJ), ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE POTENTIEL D’OXYDATION PHOTOCHIMIQUE DE L’ETAPE BIORAFFINERIE	188
TABLEAU 132 – MISE EN PERSPECTIVE DES GAINS D’EMISSION DE CO DES ETHANOLS (HORS CANNE)	189
TABLEAU 133 – POTENTIEL D’EMISSIONS EUTROPHISANTES D’UN CARBURANT GAZOLE, POUR UN MJ	190
TABLEAU 134 – POTENTIEL D’EMISSIONS EUTROPHISANTES D’UN CARBURANT ESSENCE POUR UN MJ	190
TABLEAU 135 – POTENTIEL D’EMISSIONS EUTROPHISANTES DES FILIERES COLZA ET SOJA	191
TABLEAU 136 - POTENTIEL D’EMISSIONS EUTROPHISANTES DES FILIERES BLE (ETHANOL ET ETBE).....	191
TABLEAU 137 – EUTROPHISATION EMHV DE COLZA : DETAILS DES FLUX CONTRIBUTEURS.....	191
TABLEAU 138 - EUTROPHISATION ETHANOL DE BLE : DETAILS DES FLUX CONTRIBUTEURS	192
TABLEAU 139- ANALYSE DE SENSIBILITE : TEST SUR LES EMISSIONS EUTROPHISANTES DES SITES D’ESTERIFICATION.....	192
TABLEAU 140 - ANALYSE DE SENSIBILITE : TEST SUR LES EMISSIONS EUTROPHISANTES DES ETHANOLERIES.....	193
TABLEAU 141 – RESULTAT EMHV DE COLZA (PAR MJ) DE L’ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE POTENTIEL D’EUTROPHISATION DES EMISSIONS DES SITES D’ESTERIFICATION	193
TABLEAU 142 - RESULTAT ETHANOL DE BLE (PAR MJ), ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE POTENTIEL D’EUTROPHISATION DE L’ETAPE BIORAFFINERIE	193
TABLEAU 143 – ANALYSE DE SENSIBILITE : TEST SUR LE LESSIVAGE AGRICOLE, ETHANOL DE BLE.....	194
TABLEAU 144 – COMPARAISON ENTRE ALLOCATION ENERGETIQUE ET ALLOCATION MASSIQUE, EMHV DE COLZA	196
TABLEAU 145 - COMPARAISON ENTRE ALLOCATION ENERGETIQUE ET ALLOCATION MASSIQUE, ETHANOL DE BLE	196
TABLEAU 146 - COMPARAISON ENTRE ALLOCATION ENERGETIQUE ET ALLOCATION ECONOMIQUE, EMHV DE COLZA	197
TABLEAU 147 - COMPARAISON ENTRE ALLOCATION ENERGETIQUE ET METHODE DE SUBSTITUTION : EMISSIONS DE GES DE L’ETHANOL DE BLE.....	199
TABLEAU 148 - COMPARAISON ENTRE ALLOCATION ENERGETIQUE ET METHODE DE SUBSTITUTION : EMISSIONS DE GES DE L’EMHV DE COLZA	201
TABLEAU 149 – CHARGES ENVIRONNEMENTALES DES COPRODUITS.....	202
TABLEAU 150 – QUANTITES PRODUITES ET CHARGES ENVIRONNEMENTALES DES COPRODUITS	202

TABLEAU 151 – BILAN COMPARATIF ENTRE E85 ET E10 POUR UN ETHANOL DE MAÏS.....	203
TABLEAU 152– BILAN COMPARATIF ENTRE B30 ET B10 POUR UN BIODIESEL DE TOURNESOL.....	203
TABLEAU 153 – DETAIL SUR LES ETAPES DU CYCLE DE VIE DES CHANGEMENTS ENTRE E10 ET E85 : ETHANOL DE MAÏS, INDICATEUR GES	205
TABLEAU 154 – ANALYSE DE SENSIBILITE : EMISSIONS VEHICULE POUR LES ETHANOLS	205
TABLEAU 155 – RESULTATS DE L’ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE CO ₂ VEHICULE : ETHANOL DE BLE EN INCORPORATION DIRECTE ...	205
TABLEAU 156 – PART DES REGIONS DANS LA VALEUR MOYENNE DE L’ITINERAIRE TECHNIQUE « BLE ».....	206
TABLEAU 157 – RESULTATS DE L’ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LA PART DES REGIONS DANS LE RESULTAT « BLE »	206
TABLEAU 158 – DETAIL DES NIVEAUX DE CAS MAXIMAL, RAMENE PAR MJ DE BIOCARBURANT	209
TABLEAU 159 – RESULTATS PROSPECTIFS POUR UN ETHANOL DE MAÏS SOUS FORME D’ETBE, PAR MJ D’ETHANOL.....	212
TABLEAU 160 - RESULTATS PROSPECTIFS POUR UN ETHANOL DE BLE SOUS FORME D’ETBE, PAR MJ D’ETHANOL.....	212
TABLEAU 161 – ORDRES DE GRANDEUR POTENTIELS DES EFFETS D’INCORPORATION SUR LES RAFFINERIES	216
TABLEAU 162 – RAPPEL DES REDUCTIONS ESTIMEES SUR LES POTENTIELS D’EMISSIONS DE GES POUR LES TROIS ETUDES PAR RAPPORT AUX FILIERES FOSSILES DE REFERENCE RESPECTIVES.	218
TABLEAU 163 - COMPARAISON AVEC LES VALEURS PROPOSEES PAR LA DIRECTIVE, TOTAUX.....	219
TABLEAU 164 – COMPARAISON AVEC LES VALEURS PROPOSEES PAR LA DIRECTIVE, DETAIL.....	219
TABLEAU 165 – VALEURS COMPAREES DES INVENTAIRES CLES UTILISES	222
TABLEAU 166 – FACTEURS D’EMISSION DE N ₂ O	223
TABLEAU 167 – COMPARAISON DES ALLOCATIONS DES CHARGES DE L’AMONT AGRICOLE.....	223
TABLEAU 168 – QUANTIFICATION DES SOURCES D’ECART SUR L’ETAPE AGRICOLE DU BLE	225
TABLEAU 169 – QUANTIFICATION DES SOURCES D’ECART SUR L’ETAPE INDUSTRIELLE DU COLZA	225

Figures

FIGURE 1 – DIFFERENTS TYPES DE RESULTATS POUR UN ETBE DE MAÏS, INDICATEUR ENERGIE NON RENOUVELABLE	27
FIGURE 2 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DES FILIERES BIOCARBURANTS	28
FIGURE 3 – ILLUSTRATION DU CALCUL PRATIQUE D’UNE ACV ET DU VOCABULAIRE UTILISE.....	30
FIGURE 4 - MODELISATION DES FLUX DE NUTRIMENTS N.....	41
FIGURE 5 – SCHEMA DU SYSTEME CONSIDERE POUR L’ETBE VOIE CHIMIQUE	59
FIGURE 6 - SCHEMA DU SYSTEME CONSIDERE POUR L’ETBE VOIE RAFFINERIE.....	59
FIGURE 7 - CYCLE NORMALISE EUROPEEN DE COMBUSTION	68
FIGURE 8 – CYCLE ARTEMIS URBAIN	69
FIGURE 9 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DES FILIERES ESSENCE ET GASOIL	87
FIGURE 10 – PRESENTATION SYNTHETIQUE DU PERIMETRE RETENU, COLZA ET TOURNESOL	90
FIGURE 11 - PRESENTATION SYNTHETIQUE DU PERIMETRE RETENU, EMHV DE SOJA	95
FIGURE 12 - PRESENTATION SYNTHETIQUE DU PERIMETRE RETENU, EMHV DE PALME.....	98
FIGURE 13 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DES FILIERES HUILE VEGETALES PURES.....	100
FIGURE 14 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DES FILIERES ESTERS DE GRAISSES ANIMALES ET HUILES ALIMENTAIRES USAGEES	103
FIGURE 15 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DE LA FILIERE ETHANOL DE BLE	108
FIGURE 16 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DE LA FILIERE ETHANOL DE MAÏS	111
FIGURE 17 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DE LA FILIERE ETHANOL DE BETTERAVE	115
FIGURE 18 – DESCRIPTION DU CYCLE DE VIE DE LA FILIERE ETHANOL DE CANNE A SUCRE	118
FIGURE 19 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	130
FIGURE 20 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	130
FIGURE 21 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	131
FIGURE 22 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	132
FIGURE 23 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	133
FIGURE 24 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	133
FIGURE 25 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	136
FIGURE 26 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	136
FIGURE 27 - IMPACT POTENTIEL DU CAS DIRECT POUR L’EMHV DE SOJA BRESILIEN	137
FIGURE 28 - IMPACT POTENTIEL DU CAS DIRECT POUR L’EMHV DE SOJA BRESILIEN ET INDIRECT POUR L’EMHV DE SOJA USA	137
FIGURE 29 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	138
FIGURE 30 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	140
FIGURE 31 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	140
FIGURE 32 – EMHV DE PALME : IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT D’AFFECTATION DES SOLS DIRECT	141
FIGURE 33 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	142
FIGURE 34 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	143
FIGURE 35 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	144
FIGURE 36 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	146
FIGURE 37 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	148
FIGURE 38 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	148
FIGURE 39 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	149
FIGURE 40 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	150
FIGURE 41 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	151
FIGURE 42 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	151
FIGURE 43 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	152
FIGURE 44 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	153
FIGURE 45 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	154
FIGURE 46 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	155
FIGURE 47 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	156
FIGURE 48 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	156
FIGURE 49 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	157
FIGURE 50 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	158
FIGURE 51 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	159
FIGURE 52 – CONSOMMATION D’ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUVELABLE PAR MJ DE BIOCARBURANT	161
FIGURE 53 – EMISSIONS DE GES PAR MJ DE BIOCARBURANT	161
FIGURE 54 – CHANGEMENT DIRECT D’AFFECTATION DES SOLS POUR LA CANNE A SUCRE.....	162

FIGURE 55 – CONTRIBUTION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE DU BIOCARBURANT POUR LES 5 INDICATEURS	162
FIGURE 56 – DETAIL PAR CONTRIBUTEURS DES IMPACTS DE L'ETAPE ETBE	165
FIGURE 57 – EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DU « CHAMP A LA ROUE » SANS CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS : VALEURS RAMENEES A L'ETHANOL, LORSQUE INCORPORE DIRECTEMENT OU SOUS FORME D'ETBE DANS UN E10.....	169
FIGURE 58 - EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE « CHAMP A LA ROUE » SANS CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS : FILIERES ESTERS, INCORPOREES DANS DES B10.....	170
FIGURE 59 – ILLUSTRATION DES DIFFERENTES ALLOCATIONS : INDICATEUR EMISSION DE GES POUR L'EMHV DE COLZA (KG EQ CO ₂ /MJ)	198
FIGURE 60 – ILLUSTRATION DU CALCUL PAR SUBSTITUTION DES TOURTEAUX DE SOJA PAR DES DRECHES DE BLE, SANS ET AVEC PRISE EN COMPTE DE CAS DIRECTS POUR LA CULTURE DE SOJA AU BRESIL : EMISSIONS DE GES DE L'ETHANOL DE BLE	199
FIGURE 61 – EXEMPLE DE CALCUL PAR SUBSTITUTION DES TOURTEAUX POUR LES EMHV DE COLZA : EMISSION DE GES (SANS ET AVEC CAS DIRECT AU TOURTEAU DE SOJA BRESILIEN SUBSTITUE).....	200
FIGURE 62 – BILAN GES DES ETHANOLS INCORPORES DANS E10 ET E85, EN INCORPORATION DIRECTE	204
FIGURE 63 – IMPACT POTENTIEL DU CAS DIRECT POUR L'EMHV DE PALME	207
FIGURE 64 – RAPPEL : IMPACT POTENTIEL DU CAS DIRECT POUR L'ETHANOL DE CANNE A SUCRE	208
FIGURE 65 - RAPPEL : IMPACT POTENTIEL DU CAS DIRECT POUR L'EMHV DE SOJA BRESILIEN	208
FIGURE 66 - RAPPEL : IMPACT POTENTIEL DU CAS DIRECT POUR L'EMHV DE SOJA BRESILIEN ET INDIRECT POUR L'EMHV DE SOJA USA	209
FIGURE 67 - ANALYSE DE SENSIBILITE : CHANGEMENT INDIRECT D'AFFECTATION DES SOLS, EMHV COLZA, BILAN EMISSION DE GES (KG EQ CO ₂ /MJ)	210
FIGURE 68 - ANALYSE DE SENSIBILITE : CHANGEMENT INDIRECT D'AFFECTATION DES SOLS, ETHANOL DE BETTERAVE, BILAN DES EMISSIONS DE GES (KG EQ CO ₂ /MJ)	210

1. GLOSSAIRE

ACV : Analyse de Cycle de vie

CAS : Changement d'Affectation des sols

CIPAN : Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CML : (Centrum voor Milieukunde Leiden) : Centre de l'Université de Leiden ayant développé un modèle de caractérisation pour ACV proposant des facteurs d'impact pour différents indicateurs environnementaux.

CORINAIR : (CORe INventory of AIR emissions) programme pour la collecte, la coordination et la cohérence des informations sur les émissions atmosphériques de la Communauté Européenne.

COVNM : Composés Organiques Volatiles, Non incluant le Méthane

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DDGS : Distilled dried Grain and Soluble

ETBE : Ethyle tertio Butyle Ether

EMHV : Ester Méthylique d'Huiles Végétales (colza, soja, palme, tournesol)

EMGA : Ester Méthylique de Graisses Animales

EMHAU : Ester Méthylique d'Huiles Alimentaires Usagées

EnF : Energie Fossile, parfois utilisée par abus de langage pour « énergie non renouvelable »

FCC : Fluid Catalytic Cracking : unité de craquage catalytique

FNE : France Nature Environnement

GES : Gaz à Effet de Serre.

GIEC : Groupement Intergouvernemental d'Etude sur le Climat.

GN : gaz naturel

HDS : Unité d'Hydro-DéSulfuration

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

ICPE : Installation Classée Pour l'Environnement

IFP : Institut Français du Pétrole

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

ITB : Institut Technique de la Betterave

MAAP : Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture, et de la Pêche

MEEDDM : Ministère de l'Environnement, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer

MJe : Mégajoule électrique : énergie électricité consommée

MJf : Mégajoule d'énergie non renouvelable

Ms : matière sèche

OCM Sucre : Organisation Commune de Marché pour la filière sucre

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PNAQ : Plan National d'Affectation des Quotas (quotas maximaux d'émission CO₂ des industries)

TBA : Alcool Tertio Butyle

Tkm : Tonne x kilomètre : unité très utilisée en ACV du déplacement d'une masse sur une distance.

UFIP : Union Française des Industries Pétrolières

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

2.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les préoccupations climatiques deviennent chaque jour plus prégnantes. Les preuves d'un changement climatique d'origine anthropique s'étoffent. Même si les conséquences d'un tel changement restent pour la plupart difficiles à prévoir, ce problème environnemental majeur fait désormais l'objet d'attentions marquées des gouvernements et des opinions publiques.

Dans ce contexte, les biocarburants connaissent un intérêt croissant ces dernières années. Cet engouement repose essentiellement sur leur potentiel en terme de réduction de la consommation d'énergie non renouvelable, notamment de pétrole, et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour le secteur des transports. En effet, celui-ci génère aujourd'hui environ 14% des émissions de GES mondiales avec un rythme de croissance d'environ 2% par an particulièrement difficile à réduire.

La question des bilans des biocarburants sur ces deux critères (émission de GES et consommation d'énergie non renouvelable) est donc fondamentale car elle justifie en grande partie les différentes formes de soutien mises en place par les Pouvoirs Publics pour assurer le développement de ces filières. Ainsi, de nombreuses études se sont portées sur la comparaison des biocarburants aux carburants pétroliers équivalents (essence et gazole) afin d'évaluer le potentiel de réduction des émissions de GES associé à l'usage des biocarburants dans les transports.

➤ Vers une « certification » des biocarburants

La directive 2009/28/CE du 29 avril 2009 sur les Energies Renouvelable (directive EnR) fixe un objectif contraignant demandant à ce que chaque Etat membre veille à ce que la part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans toutes les formes de transports soit au moins égale à 10% de sa consommation finale d'énergie dans le secteur des transports d'ici 2020. Cet objectif est donné sous la réserve que la production ait un caractère durable et que les biocarburants de la seconde génération soient disponibles sur le marché.

La directive EnR introduit plusieurs critères permettant de qualifier la durabilité des biocarburants.

Ainsi, les biocarburants ne devront pas être produits à partir de terres reconnues comme étant de grande valeur en termes de diversité biologique : forêt non perturbée par une activité humaine importante, zone affectée à la protection de la nature, prairies présentant une grande valeur sur le plan de la biodiversité. Ils ne devront pas être produits à partir de terres présentant un important stock de carbone, c'est-à-dire de zones humides (terres couvertes ou saturées d'eau en permanence ou pendant une partie importante de l'année, notamment les tourbières vierges) ou de zones forestières continues (d'une étendue de plus de 1 hectare, caractérisée par un peuplement d'arbres d'une hauteur supérieure à 5 mètres et des frondaisons couvrant plus de 30 % de sa surface).

Parmi ces critères, il en est un majeur portant sur les émissions de gaz à effet de serre. Afin qu'un biocarburant participe à l'objectif de réduction, il sera nécessaire à la filière concernée de prouver que le biocarburant produit permet une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 35 % par rapport aux équivalents fossiles. Ce gain devra même atteindre un minimum de 50 % à partir de 2017. La détermination de ce gain nécessite de conduire une analyse de cycle de vie du

biocarburant produit. Même si la directive EnR fournit des éléments de calculs du bilan environnemental des biocarburants, dans son annexe V, un tel travail est complexe et nécessite des hypothèses de calcul influençant le résultat de manière non négligeable. L'existence d'effets indirects sur les marchés ajoute à cette complexité. Ces difficultés alimentent la critique et la diffusion de messages contradictoires sur le caractère bénéfique ou non de ces filières.

Dans ce contexte et pour éviter les écueils et critiques des méthodologies de calculs mobilisées, les pouvoirs publics français ont d'abord souhaité disposer d'un référentiel méthodologique d'analyse des impacts des filières biocarburants sur les gaz à effet de serre et les consommations d'énergie liés à ces filières au niveau français. L'enjeu résidait dans la conduite d'un véritable travail d'ingénierie méthodologique visant à aboutir à l'établissement d'un référentiel commun et partagé par l'ensemble des parties prenantes.

Ce travail de consensus a été conduit en 2007-2008 et a abouti à la rédaction d'un référentiel définissant des recommandations pour la réalisation d'ACV pour les biocarburants. Ce travail, mené au niveau français et en parallèle à la Directive Européenne, a conduit à la construction d'une méthode nationale de calcul en parallèle à celle définie par la Commission. Ce travail présente une cohérence globale avec la directive, notamment en terme de principe d'allocation basé sur les prorata énergétiques, mais s'est attaché à un niveau de détail plus fin, étape par étape.

➤ Objectifs de l'étude

La présente étude a pour objectif de réaliser l'analyse de cycle de vie des filières biocarburants actuelles (appelées aussi « de première génération ») en appliquant les principes retenus dans le référentiel de 2008. Ce travail a été réalisé avec le soutien technique des acteurs industriels, des instituts techniques, de centres de recherches, d'associations environnementales.

Intégrant bien le contexte européen et souhaitant mettre en perspective les résultats obtenus, cette étude procède dans un second temps à l'analyse des résultats obtenus au regard d'autres méthodologies, dont celle de la directive. Ce regard critique et constructif permet de souligner les points de vigilance à garder présent à l'esprit dans les échanges communautaires au sujet de la quantification de la durabilité des biocarburants.

2.2. COMMANDITAIRES DE L'ETUDE

Cette étude a été réalisée pour le compte de l'ADEME, du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, du Ministère de l'Environnement, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer et de FranceAgrimer (ex ONIGC).

3. PRINCIPES GENERAUX DE CETTE ACV

3.1. INTRODUCTION

L'étude préparatoire de 2008 visait à revisiter les questions méthodologiques faisant débat lors de la réalisation d'ACV sur les biocarburants, pour en proposer une synthèse et préconiser une approche quant à la manière d'aborder chaque question. Cette synthèse méthodologique a donné lieu à l'élaboration d'un référentiel définissant ainsi des recommandations pour la réalisation d'ACV sur ce domaine.

Dans ce chapitre sont rappelées les frontières, unités fonctionnelles, et modalités méthodologiques préconisées dans ce référentiel. Ces extraits apparaissent en italique dans le corps du texte. Toute personne désirant un niveau de détail plus fin peut utilement se reporter au référentiel, disponible en téléchargement sur le site Internet de l'ADEME <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=54210&p2=14228&ref=14228>.

La présente étude prolonge ces travaux par la réalisation concrète des Analyses de Cycle de Vie sur la base de ces recommandations. Elle élargit le champ d'étude en intégrant l'ETBE et les filières graisses animales et huiles alimentaires usagées. Les questions méthodologiques afférentes à ces nouvelles filières sont développées dans une partie spécifique.

3.2. UNE ORGANISATION EN COMITES

A côté du comité de pilotage composé des commanditaires de l'étude, un comité technique a été mis en place. Son rôle a été de discuter et de valider les travaux de cette étude, ainsi que d'épauler sa réalisation par la fourniture d'informations ou de données. Ce comité représentait l'ensemble des parties prenantes de la problématique, avec la société civile représentée via les associations environnementales, l'ensemble des acteurs industriels des filières, les instituts techniques agricoles, et les représentants de l'Etat membres du comité de pilotage. La liste des participants est donnée en p2 de ce rapport.

3.3. PRESENTATION DES FILIERES ETUDIEES

Le champ de la présente étude couvre :

- ▶ Les filières bioéthanol : betterave, maïs, blé et canne à sucre, en incorporation directe ou sous forme d'ETBE.
- ▶ Les filières biodiesel : colza, tournesol, soja, palme, graisses animales et huiles alimentaires usagées.
- ▶ Les filières HVP (Huiles Végétales Pures) : colza
- ▶ Les filières pétrolières : diesel et essence, sous deux spécifications : EURO4 et EURO5.

3.4. INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET MODELES DE CARACTERISATION

L'étude méthodologique s'était focalisée sur les deux enjeux environnementaux spécifiques : la déplétion des ressources, à travers l'indicateur « *consommation d'énergie non renouvelable* » et le changement climatique avec « *les émissions de gaz à effet de serre* ». Afin de s'assurer qu'on n'assiste pas à un transfert de pollution vers d'autres types d'impacts environnementaux et sanitaires, il a été décidé d'étudier 3 catégories d'impacts supplémentaires.

- ▶ Potentiel de toxicité humaine
- ▶ Potentiel d'oxydation photochimique (appelée aussi « Précurseurs d'ozone »)
- ▶ Potentiel d'eutrophisation

Il est important de **bien noter le caractère potentiel de ces trois derniers indicateurs**. En effet, ces indicateurs décrivent un **état intermédiaire et non l'impact final du problème environnemental** qu'on cherche à étudier (comme la *réduction de la durée de vie* par exemple pour les questions de santé humaine). Ces indicateurs intermédiaires sont en général plus faciles à élaborer et à concevoir mais réduisent une partie de la problématique étudiée.

La prise en compte de ces enjeux environnementaux et sanitaires complexes pose deux questions :

- Le choix des modèles de caractérisation des impacts (quels sont les effets pris en compte et comment les quantifie-t-on ?) et de l'indicateur d'impact. Les premiers permettent la mesure quantitative des émissions molécules par molécules (ou catégories par catégories). Le dernier vise à donner une idée d'un impact agrégé et comparable entre chaque filière, au regard de l'enjeu environnemental en question.

- Le choix des molécules à tracer : il découlera de l'arbitrage entre la liste des molécules ayant un impact sur ces phénomènes, et les données de flux réellement disponibles ou fiables pour ces molécules.

Ci-dessous sont résumés les éléments de compréhension et de modélisation des catégories d'impact, ainsi que le détail des indicateurs d'impact et des molécules à tracer.

3.4.1. CONSOMMATION D'ENERGIE NON RENOUVELABLE

C'est en effet un des deux avantages environnementaux mis en avant pour le développement de ressources énergétiques d'origine agricole. Les qualifier de renouvelables nécessite une vérification préalable des origines des énergies nécessaires à leur fabrication.

L'évaluation de cet impact s'obtient directement par la multiplication des quantités d'énergies non renouvelables consommées avec leur contenu énergétique. Les contenus suivants ont été utilisés. Par abus de langage, le qualificatif « énergie fossile » est parfois utilisé et regroupe aussi l'énergie nucléaire.

Tableau 1 : Valeur énergétique des ressources fossiles et nucléaires.

Energie non renouvelable, fossile	MJ PCI/kg
Charbon	26,7
gaz de mine	39,8
Gaz naturel	38,4
Pétrole brut	42,3
Energie non renouvelable, nucléaire	
Uranium	560 000

3.4.2. POTENTIEL D'EMISSION DE GAZ A EFFET DE SERRE

Le bilan des émissions de gaz à effet de serre intègre les principaux gaz contributeurs. Un indicateur correspondant à l'impact de ces émissions en terme de potentiel d'effet de serre à 100 ans a été calculé. Les coefficients retenus dans le calcul sont ceux fournis par le GIEC dans leur troisième rapport et figurent dans le tableau 2. Ces valeurs sont celles utilisées dans les autres études de référence sur le sujet et celles qui avaient servi à élaborer le référentiel 2008. Elles ont ainsi été privilégiées par rapport à la dernière mise à jour du GIEC (25 pour le méthane et 298 pour le protoxyde d'azote) qui n'introduit au final que de faibles différences dans les valeurs des indicateurs d'impact.

Tableau 2 : pouvoir de réchauffement des principaux gaz contribuant au réchauffement climatique pris en compte dans cette étude

Composés contributeurs au réchauffement climatique	pouvoir de réchauffement sur 100 ans
Dioxyde de carbone, fossile	1
Méthane, biogénique	23
Méthane, fossile	23
Protoxyde d'Azote N ₂ O	296
1,1,1,2-tétrafluoroéthane (HFC-134a)	1300
bromochlorodifluorométhane (Halon 1211)	1300
chlorodifluorométhane (HCFC-22)	1700

Le CO₂ émis dans l'atmosphère lors de la combustion des produits issus de la biomasse ou lors de la fermentation ne contribue pas à l'indicateur effet de serre. En effet, le carbone ainsi émis avait été prélevé dans l'atmosphère par la plante lors de sa croissance. Cette règle correspond aux pratiques couramment utilisées en matière de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre. En revanche, le méthane issu de la biomasse est lui comptabilisé. De même la décarbonation de la pierre à chaux avec la libération de CO₂ est un bilan neutre via l'étape de carbonatation.

3.4.3. POTENTIEL D'EUTROPHISATION

Cette catégorie d'impact couvre les effets dus à de trop hauts niveaux de nutriments dans les écosystèmes. La première conséquence de l'eutrophisation, dans son sens premier, c'est-à-dire affectant un milieu aquatique, est le développement conséquent d'algues, généralement au détriment de certaines variétés de biomasse moins résistantes. Ce développement de matière organique peut limiter fortement la quantité d'oxygène dissout dans l'eau ou bloquer l'accès à la lumière pour les espèces vivant plus en profondeur. Les conséquences exactes de l'eutrophisation

pour les milieux terrestres sont moins bien connues. Cependant, on peut relever parmi celles-ci, à l'instar de l'eutrophisation aquatique, que l'élévation du niveau de nutriments perturbe les équilibres biologiques du milieu récepteur.

Les ACV réalisées s'appuient majoritairement sur le même type de modèle. Nous détaillons ci-dessous le modèle répandu proposé par CML. Il est basé sur la contribution des molécules à fournir des atomes de N et P, qui pourront potentiellement constituer de la biomasse (K n'est pas pris en compte, car rarement limitant), estimée être de composition moyenne $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ (composition basées sur celle des algues). Ainsi, une mole de NO peut potentiellement contribuer à la formation de 1/16 de moles de biomasse. Pour la biomasse morte, dont l'impact sur l'anoxie est lié à sa dégradation par O_2 , le modèle considère qu'une mole de biomasse $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ consomme 138 moles de O_2 , mesurée par la DCO en kg de O_2 , et produit de la matière eutrophisante pouvant générer une nouvelle mole de biomasse.

Attention, **il convient de garder à l'esprit que l'indicateur d'eutrophisation qui en découle est un indicateur d'impact potentiel**. Il décrit les constituants nécessaires mais pas suffisants menant à un impact environnemental étudié, par opposition à des indicateurs décrivant les dommages réels. Cet indicateur d'impact potentiel permet d'agréger en les sommant les impacts potentiels de chaque molécule émise, pour chaque milieu d'émission. Ces impacts sont normalisés par rapport à PO_4^{3-} (kg PO_4^{3-}). Passer de ce potentiel d'eutrophisation à l'eutrophisation réelle nécessite de connaître le contexte de chaque milieu.

Tableau 3 : facteur de caractérisation des molécules potentiellement eutrophisantes.

Molécules	milieu d'émission		kg eq PO_4^{3-}
Phosphore	air, sol, eau	kg	3,06
Phosphate	eau	kg	1
acide phosphorique	air	kg	0,97
Azote	sol, eau	kg	0,42
Ammoniaque	air	kg	0,35
Ion Ammoniaque	eau	kg	0,33
Oxydes d'azote	air, eau	kg	0,13
Nitrate	eau, air	kg	0,1
Nitrite	eau	kg	0,1
DCO (Demande chimique en oxygène)	eau	kg	0,022

Tableau 4 : Synthèse de la modélisation pour l'impact « eutrophisation »

Catégorie d'impact	Eutrophisation
Justification de la sélection de cette catégorie d'impact	La production de matière végétale est source de risque d'eutrophisation. En passant de filières fossiles à des filières dont l'amont est agricole, les ACV montrent en général une augmentation des pressions sur cet indicateur pour la fabrication des biocarburants.
Modèle de caractérisation	CML, basé sur la contribution potentielle des molécules à la croissance de biomasse, traduite en termes de N ou P apportés uniquement.
Indicateur de catégorie	Pouvoir eutrophisant
Facteur de caractérisation	N, P apportés au milieu, traduit en kg équivalent de PO_4^{3-}
Pertinence environnementale	Ces deux composés sont pour bon nombre de milieux, les facteurs limitant la croissance de la biomasse.
Molécules à retenir	Liste des molécules du tableau en 4.3.

3.4.4. PRECURSEURS D'OZONE (AUSSI APPELE : FORMATION DE PHOTO-OXYDANTS)

Cette catégorie d'impact prend en compte la formation dans la troposphère de certains composés réactifs chimiques appelés photo-oxydants, dont fait notamment partie l'ozone O₃, par action du soleil sur certains polluants primaires.

De façon plus détaillée, les photo-oxydants peuvent apparaître dans la troposphère sous l'action des ultraviolets, par oxydation photochimique des composés organiques volatils (COV), et de monoxyde de carbone CO, en présence d'oxydes d'azote (NOx). L'ozone O₃ et, dans une moindre mesure, le nitrate de peroxyacétyle, ou PAN, sont considérés comme les principaux composés photo-oxydants. La totalité des effets que peut potentiellement avoir ce type de polluants est relativement mal connue. A titre d'exemple, l'ozone O₃ possède des effets sur la santé humaine d'irritation des yeux, des voies respiratoires et des muqueuses. Ces problèmes peuvent fortement s'aggraver auprès d'individus souffrant de problèmes respiratoires. Cette catégorie d'impact est également connue sous le nom de 'Formation de smog' ou 'Smog d'été'.

Les Composés Organiques Volatiles (COV) sont principalement responsables de cet effet. Mais il faut noter le rôle clé des NOx en tant que catalyseurs.

Tableau 5 : Liste indicative de quelques composés organiques volatiles, à forte réactivité

Isoprène	1,3-Butadiène	Alcènes en général	Toluène
m-Xylène	Propène	Acétaldéhyde	methyl-Cyclopentane
Ethène	Formaldéhyde	Xylène	Ethanol

Tableau 6 : synthèse de la modélisation « Précurseurs d'Ozone »

Catégorie d'impact	Précurseurs d'ozone
Justification du choix de cette catégorie d'impact	les transports sont des sources importantes d'émissions de COV, avec en plus une concentration en zone urbaine notamment, et des différences connues entre carburants fossiles et biocarburants.
Modèle de caractérisation	Concentration d'ozone troposphérique, utilisé dans CML.
Indicateur de catégorie	Potentiel de création d'ozone (en concentration d'ozone créé dans l'atmosphère)
Facteur de caractérisation	Potentiel de création photochimique d'ozone (POCP) par molécule En kg eq. Ethylène
Pertinence environnementale	L'ozone est la plaque tournante des réactions chimiques d'oxydation de l'atmosphère. C'est par sa grande réactivité que son activité de polluant agit sur les êtres vivants.
Molécules à retenir	COV identifiés ou indifférenciés NOx

3.4.5. POTENTIEL DE TOXICITE HUMAINE

Cette catégorie d'impact couvre les effets des substances toxiques sur la santé humaine. Ces substances peuvent être présentes aussi bien dans l'environnement que sur un lieu de travail. L'éventail des molécules, de leurs voies d'action, des dommages causés, eux dépendant de l'exposition, des effets des expositions indirectes, des effets de cocktail, offre une telle complexité que cette catégorie d'impact est l'une des plus délicates à modéliser. Ainsi, de manière générale, les résultats fournis sont à considérer plutôt comme des ordres de grandeur, des différences devant être observées sur plusieurs facteurs pour pouvoir conclure à une réelle différence en termes d'impacts.

Tableau 7 : principales familles de molécules toxiques

Famille	Exemples
Métaux, ions métalliques et autres composés métalliques	Arsenic, mercure, chrome, antimoine,...
COV	Aldéhydes, benzène, dichlorobenzènes, 1,3-butadiène,...
Autres polluants atmosphériques	NOx, SOx, ...
HAP	Pyrène, naphtalène, téphényl,...
Matières particulaires (PM)	<2,5 microns, < 10 microns,...
Autres molécules toxiques (notamment cancérigènes)	Pesticides, naphtalène, toluène, chlordane,...

La présente étude utilise les facteurs de caractérisation courant des analyses de cycle de vie et proposés par l'Université CML de Leiden afin de quantifier et d'agréger les potentiels risques de toxicité des molécules émises. Le tableau 8 synthétise les éléments clés de ce choix.

Tableau 8 : synthèse de la modélisation « toxicité humaine »

Catégorie d'impact	Toxicité humaine
Justification du choix de cette catégorie d'impact	La combustion de carburant, via les émissions routières principalement, est une source majeure d'émission de polluants atmosphériques, en milieu urbain tout particulièrement.
Modèle de caractérisation utilisé	CML
Indicateur de catégorie	Niveau d'exposition à des molécules à risques,
Facteur de caractérisation	Calculé à partir du modèle USES de l'environnement estimant le niveau et le devenir de la molécule dans l'environnement, et intégrant le niveau de danger de cette molécule (dose minimale sans risque en fait) pour définir un risque toxique. Cette valeur est normalisée en équivalent 1,4 Dichlorobenzène.
Molécules à retenir	Les molécules émises connues pour leur toxicité. Les principales d'entre elles sont réglementées et suivies à travers les ICPE / registre des polluants. Les molécules présentes et quantifiées dans les inventaires ECOINVENT ont aussi été comptabilisées.

3.5. UNITE FONCTIONNELLE ET FRONTIERES DU SYSTEME

3.5.1. UNITE FONCTIONNELLE

Cette étude concerne l'ensemble du cycle de vie des carburants, depuis l'extraction des ressources ou la production de la biomasse jusqu'à la combustion des carburants dans les moteurs. L'unité fonctionnelle qui en découle est donc « **Permettre le déplacement d'un véhicule sur 1 km** ».

A partir de cette unité fonctionnelle, il a été décidé de présenter les résultats calculés pour un km parcouru dans une autre unité, en les ramenant « **par MJ de carburant consommé** » afin de fournir une base plus commune permettant une interprétation plus aisée des résultats. Ce changement est rendu possible par des consommations énergétiques de carburant identiques entre les différents carburants, seule l'huile végétale pure déviant légèrement des consommations des carburants fossiles (voir Tableau 9). Il s'agit donc d'une simple division des résultats obtenus par km par la consommation du carburant.

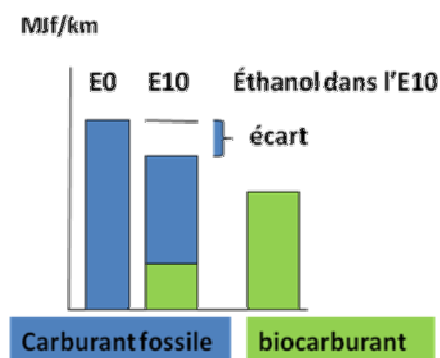
Les modalités de passage plus détaillées sont détaillées dans l'encadré suivant.

Tableau 9 – Lien entre les résultats par km parcouru et par MJ

Les calculs ont été réalisés en fonction de l'unité fonctionnelle définie par le fait de parcourir un km. L'étape véhicule prend donc en compte les données d'émissions vers l'air mesurées sur carburant réel comme le E10, E85 ou le B10 ou B30. Ces carburants contiennent tous une part de carburant fossile, les effets attendus du biocarburant sont donc proportionnellement réduits. Il est donc nécessaire de réaliser un retraitement des résultats pour vraiment donner l'impact sur un cycle de vie du biocarburant seul et non en mélange.

Le principe retenu pour le passage « bilan d'un E10 » au « bilan de l'éthanol seul utilisé dans un E10 » est le suivant : l'écart **mesuré entre les émissions sur le cycle de vie d'un carburant contenant une partie de biocarburant (E10, B10,...) par rapport aux émissions du carburant fossile de référence est à imputer en totalité au biocarburant**, selon la formule ci-dessous. Cela revient à dire que seule la perturbation (l'incorporation de biocarburant) porte les écarts engendrés au niveau des émissions véhicule. Un niveau d'impact par « km parcouru par le biocarburant seul » est ainsi calculé, selon la formule ci-dessous.

$$MJf.(éthanol) = \frac{MJf.(E10) - (1 - part_etha.(E10)) \times MJf.(E0)}{Part_etha.(E10)}$$



MJf.(biocarburant) = résultat sur l'indicateur (Energie Non renouvelable ici appelée MJf) pour un km qui aurait été parcouru par le biocarburant seul.

MJf.(E10); MJf.(E0) = résultat sur l'indicateur MJf pour un km parcouru par l'E10 et le carburant fossile de référence respectivement.

Part_etha.(E10) = part en MJ de l'éthanol dans l'E10.

Un second traitement paraît aussi nécessaire : le MJ de carburant est bien souvent l'unité la plus utilisée des études réalisées sur le sujet comme de la Directive EnR. Il a ainsi été nécessaire de convertir ce résultat dans une seconde unité. La majorité des résultats sont d'ailleurs présentés sous ce format là. De manière plus simple ici, le résultat issu du premier traitement est divisé par la consommation moyenne du carburant étudié pour obtenir le résultat par MJ de carburant.

Ces deux traitements ont été appliqués pour les cinq indicateurs. Les tableaux ci-dessous donnent deux exemples de ces calculs à partir de valeurs réelles : un pour le passage du résultat par km parcouru d'un éthanol incorporé pur, et l'autre pour un éthanol incorporé sous forme d'ETBE. Les valeurs utilisées sont des valeurs réelles utilisées ou calculées dans la présente étude.

Données nécessaires	Noms dans les formules	Valeur utilisée dans cette étude
part en MJ de l'éthanol dans l'E10	A1	6,84%
part en MJ de l'ETBE dans l'E10	A1	19,82%
part en MJ de l'éthanol dans ETBE	A2	34,54%
consommation (MJ/km)	Conso	2,2

Les données de consommation sont issues des études de l'IFP utilisées et d'un échange sur le sujet avec leur expert.

sur véhicule montrent que la consommation en MJ/km est identique pour tous les carburants de même type, c'est-à-dire qu'un MJ d'E10 ou de B10 produit le même travail qu'un MJ d'essence fossile de référence. Les mesures montrent un léger écart pour l'E85, pour lequel le rendement moteur peut être légèrement meilleur que prévu pour des conduites chargées (de l'ordre de quelques pourcents). Etant sur un cycle NEDC comme on le verra sur lequel cet effet ne se voit pas, et en raison d'un écart peu marqué, cet effet n'a pas été pris en compte. En revanche, une légère surconsommation d'huile végétale utilisée pure a été prise en compte. Les valeurs suivantes ont été utilisées :

Tableau 10 – Consommations d'énergie au km parcouru utilisées dans cette étude

Consommation des véhicules légers (en MJ/km)	Essence, éthanol, ETBE	Gasoil, esters méthyliques	Huile végétale Pure
EURO 4	2,20	1,70	1,78
EURO 5	1,73	1,43	

Source : données issues des 2 études IFP (EURO4) et de Renault (EURO5)

La suite du calcul se déroule de la manière suivante :

- calcul de l'analyse de cycle de vie pour un km parcouru avec le carburant réel (E10, B10, B30,...) :

calculs des ACV « par km parcouru » à partir de l'outil de calcul		MJf/km parcouru
Essence fossile de référence : MJf(E0)	B	2,69
E10 d'Ethanol de maïs (MJf(E10))	C	2,60
E10 d'Ethanol de maïs sous forme d'ETBE (MJf(E10))	C	2,65

- Puis application de la formule précédente pour se ramener à un km parcouru par le biocarburant :

Calcul de la formule précédente		
MJf/ km parcouru par la partie éthanol ou ETBE du mélange	MJf / km parcouru par la partie éthanol dans ETBE	MJf/MJ éthanol
$D1=(C-(1-A1)xB)/A1$	$D2=(D1-(1-A2)xB)/A2$	$F = D / \text{Conso(MJ/km)}$
1,26		5,75E-01
2,49	2,11	9,58E-01

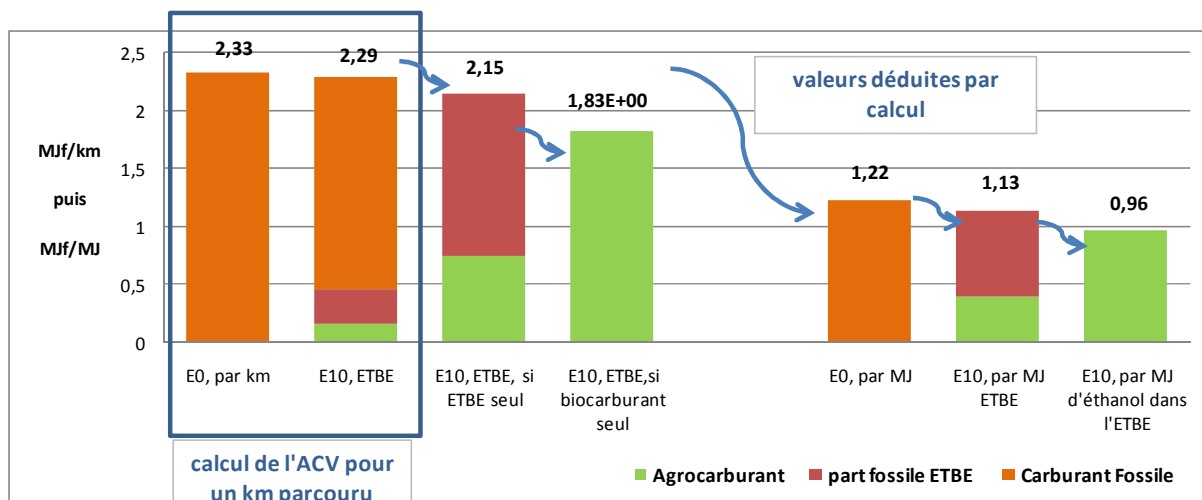
Ce résultat par MJ est ensuite décomposé en différentes composantes pour une analyse des contributions de chaque étape du cycle de vie. L'étape « véhicule » mérite d'être décrite spécifiquement ici. En effet, par rapport à des cycles de vie qui s'arrêtent au niveau du réservoir, les émissions réelles de l'étape « véhicule » sont intégrées à ces résultats. Elles traduisent l'effet sur la combustion d'avoir incorporé un biocarburant en mélange avec un carburant fossile. Attribuer un effet au biocarburant nécessite de calculer l'écart par rapport à la combustion du carburant fossile et de ramener cet écart sur le seul biocarburant du mélange. En raison de ce calcul, il est possible d'atteindre des niveaux négatifs, signifiant que le biocarburant réduit aussi les émissions du carburant fossile avec lequel il a été mélangé. Un

10% d'essence par d'autres composés fossiles ayant leur propre cycle de vie.

exemple avec des valeurs fictives	émission d'une molécule Y
E0	100 kg/km E0
E10	80 kg/km E10
proportion d'éthanol dans l'E10	10 % en MJ
hypothèse sous-jacente	les 90 % d'essence du mélange E10 se seraient comportés normalement en l'absence d'éthanol, et auraient émis 90 kg
	L'écart par rapport à cette référence est donc à attribuer à l'éthanol lorsqu'on regarde le bilan au niveau de l'éthanol seul et non plus au niveau de l'E10
calcul	$Em(\text{éthanol}) = (80 - 0,90 \times 100) / 0,10$
niveau d'émission de l'éthanol dans l'E10 pour la molécule Y	-100 kg / km parcouru par l'éthanol

En résumé, le schéma suivant récapitule l'ensemble de ces résultats potentiels.

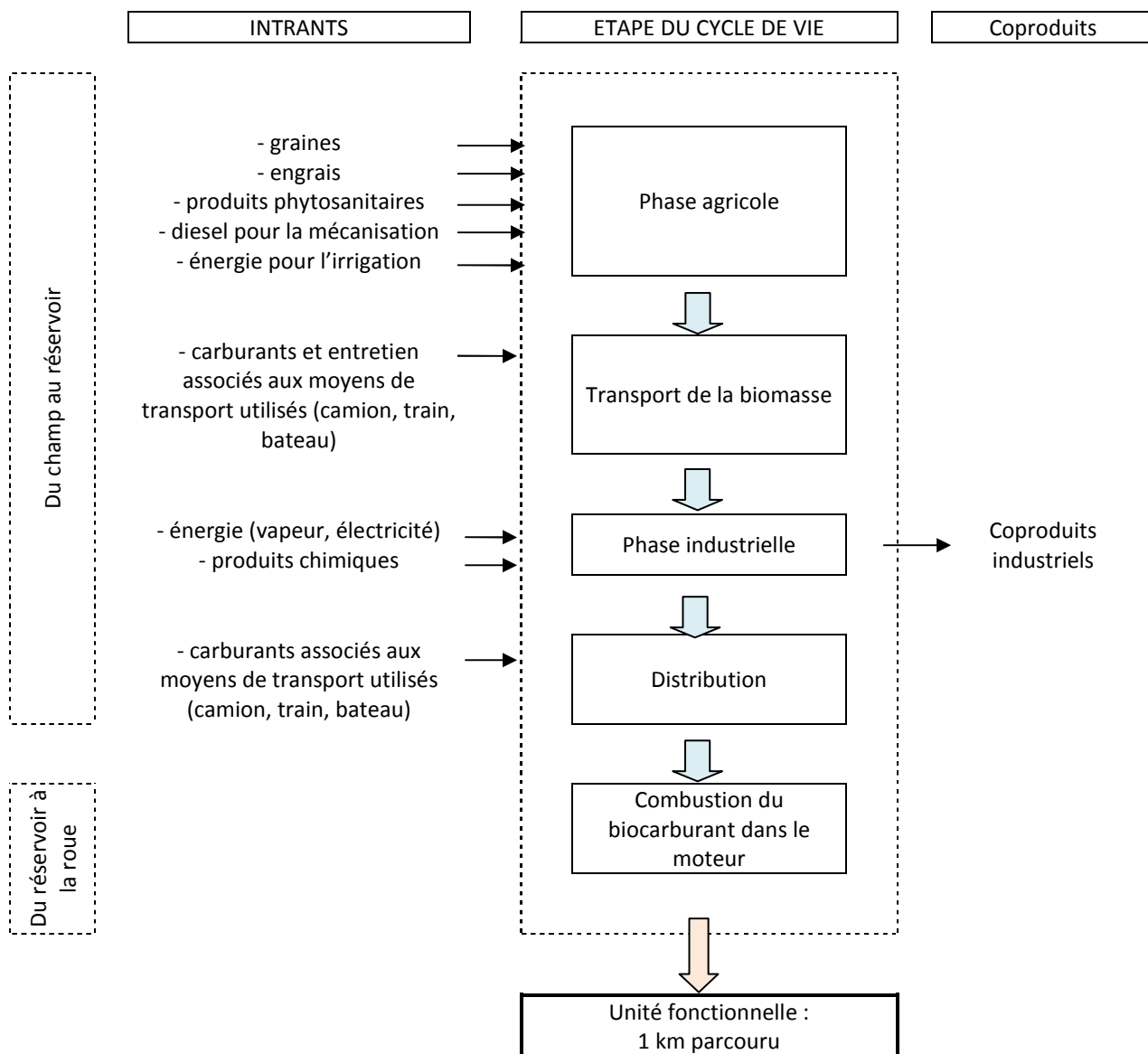
Figure 1 – Différents types de résultats pour un ETBE de maïs, indicateur Energie non Renouvelable



3.5.2. FRONTIÈRES ET ÉTAPES DU SYSTÈME

Les résultats sont analysés en décomposant les étapes de fabrication du carburant et son utilisation, dénommée dans la présente étude « partie véhicule » ou parfois simplement « combustion ». Le diagramme ci-dessous présente les étapes du cycle de vie considérée dans cette étude.

Figure 2 – Description du cycle de vie des filières biocarburants



Note : Pour les filières EMHV d'huiles importées (huile de soja, huile de palme), la phase industrielle est scindée en deux étapes, l'extraction de l'huile ayant lieu sur le sol de la région productrice de l'huile, et l'estérification qui a lieu en France. Pour ces filières, nous tenons compte de l'étape additionnelle de transport de l'huile.

Ce périmètre doit être ponctuellement élargi au cours d'une analyse de sensibilité visant à simuler les effets potentiels des changements indirects d'affectation des sols sur les bilans calculés. Il est

alors nécessaire d'intégrer dans ce périmètre les terres nécessaires à satisfaire un niveau de demande équivalent de demande alimentaire.

L'étape agricole : le système considéré est la parcelle agricole. Tout ce qui y entre et en sort lié à l'exploitation agricole de cette terre est pris en compte. Ainsi sont intégrées dans cette étape toutes les consommations d'intrants apportés par l'homme nécessaires à la production agricole, ainsi que les étapes de fabrication de ces intrants. Cela comprend la consommation de fioul pour la culture et pour son transport, les intrants de fertilisation, de défense des végétaux, le séchage ou l'irrigation le cas échéant, les semences. En revanche, conformément au référentiel, l'amortissement du matériel agricole et des bâtiments n'est pas pris en compte. Les produits extraits du système sont pris en considération ainsi que les émissions liées à ces activités humaines. Les émissions de N₂O, de nitrate, d'ammoniac, de pesticide vers l'eau, l'air ou le sol, ainsi que les molécules liées à la combustion du gasoil lors des travaux sont prises en compte.

L'étape industrielle : de la même façon que précédemment, tous les flux entrants et sortant du périmètre du site de fabrication sont comptabilisés, à l'exception de ceux liés au personnel (déplacement, éclairage des locaux,...). Les flux d'intrants principaux sont l'énergie consommée pour la production et les réactifs nécessaires. Les émissions des bioraffineries sont aussi intégrées (voir la partie sur les indicateurs suivis).

L'étape de production de l'ETBE : l'ETBE est fabriqué à partir d'éthanol et présente des propriétés intéressantes pour une utilisation en carburant. Pour cette étape supplémentaire, les flux d'intrants principaux sont l'énergie consommée pour la production et les réactifs nécessaires. Les émissions des sites de fabrication sont aussi intégrées (voir la partie plus détaillée en 4.4).

Les étapes transports et distribution : sous ce nom générique sont regroupées toutes les consommations et émissions liées aux transports des produits étudiés. Un transport spécifique des intrants n'a pas été pris en compte pour deux raisons. D'une part, les inventaires ECOINVENT vont jusqu'à la mise à disposition dans un dépôt ou magasin de vente, avec des hypothèses moyennes de transports vers ces lieux dont l'imprécision est supérieure à ce que rajouterait le transport ultime vers l'utilisateur. D'autre part, les quantités d'intrants utilisées par MJ produit restent faibles, leur transport compterait pour moins de 0,5g eq.CO₂/MJ. La règle de coupure¹ a été appliquée. La distribution comprend uniquement l'électricité nécessaire au fonctionnement des stations services.

L'étape véhicule : seuls les flux liés à la combustion ont été pris en compte (consommation de carburant et émissions vers l'air). Ce choix a été fait en raison de l'objectif comparatif dédié à cette étude. Les amortissements et réparation du véhicule sont considérés identiques ou en tout cas de variation marginale, quel que soit le carburant.

Pour les **filières fossiles**, ces mêmes étapes sont prises en compte et intègrent la production du pétrole brut, son transport, son raffinage, sa mise à disposition et les émissions afférentes.

Les schémas inclus dans le chapitre 5 détaillent pour les filières étudiées les frontières des systèmes.

- Production des essences et gazoles fossiles de référence
- Production d'esters à partir de matières premières agricoles produites sur le territoire français (colza et tournesol),
- Production d'huile végétale pure,

¹ Pour rappel, la règle de coupure utilisée dans les ACV est que la somme des éléments écartés de l'analyse ne représente pas plus de 5% des impacts environnementaux totaux du cycle de vie.

- Production d'esters d'huile de palme et de soja,
- Production d'EMGA et EMHAU,
- Production d'éthanol sur le territoire français avec trois schémas différenciés pour les filières blé, maïs et betterave.
- Production d'éthanol à partir de canne à sucre.

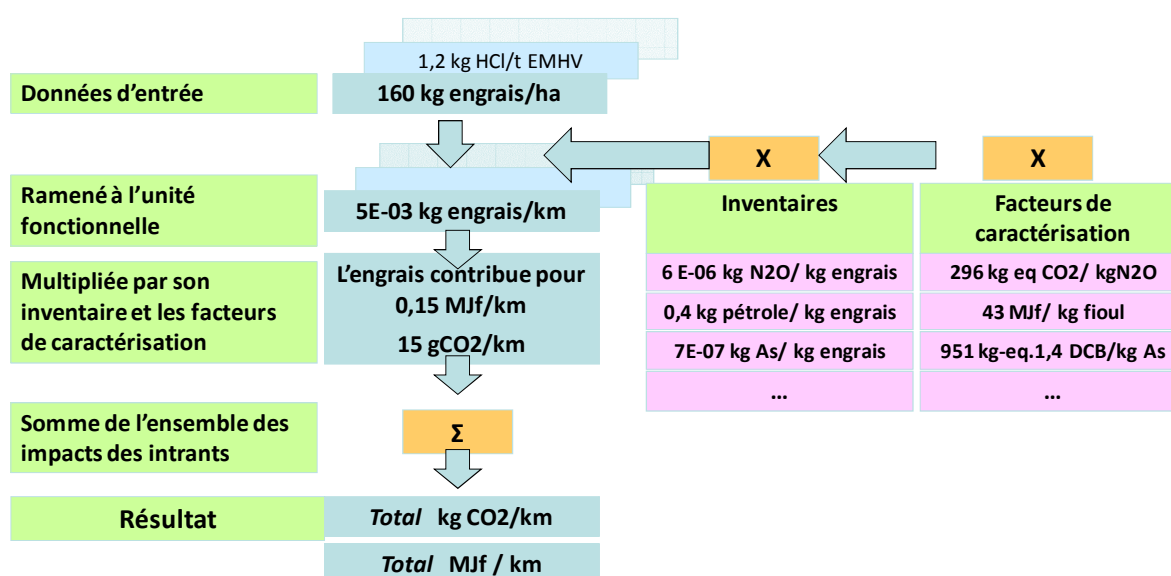
3.6. RAPPEL DES PRINCIPES DE CALCUL D'UNE ANALYSE DE CYCLE DE VIE

La figure 3 décrit sommairement le principe de calcul d'une analyse de cycle de vie et donne les termes utilisés pour les différents types de données nécessaires à la réalisation de ce calcul.

Sur le cycle de vie du produit étudié, les intrants nécessaires ou afférents sont apportés au système (l'engrais dans l'exemple de la figure 3) en quantité déterminée. Ces intrants sont comptabilisés dans l'impact du produit étudié après avoir réalisé 3 opérations :

- ▶ La quantité apportée d'intrant ou l'émission est ramenée à l'unité fonctionnelle du produit étudié.
- ▶ L'impact environnemental de cet intrant est calculé à partir d'inventaires de cycle de vie, liste préétablie de flux prélevés dans l'environnement ou émis pour la mise à disposition d'une unité de cet intrant. Ces flux physiques sont traduits en impacts environnementaux en utilisant des facteurs de caractérisation adaptés aux indicateurs environnementaux suivis (consommation d'énergie non renouvelable, émission de gaz à effet de serre, toxicité...).
- ▶ L'ensemble des impacts de chaque intrant et sortant est sommé pour les indicateurs environnementaux suivis, afin de proposer une valeur agrégée au niveau souhaité de l'analyse (l'ensemble du cycle, sous étape,...).

Figure 3 – Illustration du calcul pratique d'une ACV et du vocabulaire utilisé



Nota bene : les données quantitatives ci-dessus sont proposées à titre illustratif

3.7. REGLES D'ALLOCATION

Un des points sensibles de toute ACV réside dans les règles définies pour répartir les charges environnementales entre produits étudiés et éventuel(s) coproduit(s). Ce choix mérite d'être clairement explicité de part son influence sur le résultat.

3.7.1. FILIERES BIOCARBURANTS : GENERALITES

Les règles d'allocation utilisées pour les coproduits sont celles définies dans le référentiel 2008. Le tableau ci-dessous synthétise les recommandations faites, les explications plus détaillées des raisons conduisant à ces choix sont à lire dans le référentiel lui-même.

Tableau 11 – Synthèse des recommandations concernant les méthodes d'allocation

Les coproduits sont...	La Méthode recommandée est	Précaution
...épanchés	Substitution	...
... utilisés en alimentation animale	Prorata énergétique entre coproduits d'une étape	Faire une analyse de la réalité physique du procédé en amont
...utilisés dans l'industrie		
...utilisés à des fins énergétiques	Substitution	Mix énergétique si export d'électricité

Il n'a pas été attribué aux pailles une partie des intrants de productions, ces dernières n'étant pas exportées tout le temps. L'approche retenue a surtout cherché à être la plus transversale possible entre filières. Ainsi, les pailles et les résidus de cultures pour les filières sont considérés comme restant au champ et fournissant des sources d'azote ou d'autres éléments pour les cultures suivantes. Les apports d'azote minéral sont donc modulés par le différentiel entre l'azote des résidus de la culture précédente et celui des résidus de la filière étudiée, pratiquant ainsi une substitution conformément au référentiel 2008.

3.7.2. DETAIL DES ALLOCATIONS APPLIQUEES AUX BIOCARBURANTS

Les allocations mises en œuvre dans cette étude sont celles validées dans le référentiel méthodologique de 2008. **Cela signifie que des prorata énergétiques sont appliqués étape par étape pour cette ACV.**

D'un point de vue pratique, les charges d'une étape considérée sont attribuées à un produit au prorata de sa quote-part énergétique, obtenue en multipliant les masses des produits par leur PCI à sec, dont les valeurs sont données en annexe 3. Les allocations portent parfois sur un des composants du coproduit, comme le sucre utile qui donnera par la suite l'éthanol pour la répartition des charges de l'amont jusqu'à la saccharification.

Les deux exemples ci-dessous illustrent ces calculs pour l'EMHV de tournesol et l'éthanol de blé (les données blé sont arrondies à des valeurs entières pour des questions de confidentialité). Ainsi, 65% des charges de l'amont agricole ainsi que de l'étape de trituration sont imputées à l'huile brute pour l'EMHV de tournesol. Ces charges se répartissent lors de l'étape suivante entre les deux produits qui vont être issus de cette huile brute (huile neutre et huiles acides), et ainsi de suite. **Il faut donc bien noter que ces répartitions sont faites étape après étape et sont donc bien souvent cumulatives.**

Une exception existe dans le cas de l'exemple du blé. Les allocations entre l'amont-saccharification et la fermentation ne se cumulent pas, les coproduits n'étant en réalité pas encore séparés (les deux font intervenir par exemple les matières sèches qui formeront les futures drèches). C'est pour coller aux justifications de l'existence des procédés qu'un tel découpage a été mis en place et permet de faire porter les allocations au plus juste des produits formés. De manière à éclairer le lecteur, des explications issues du référentiel méthodologique ont été incluses dans le tableau 14 pour le cas de l'application des proratas aux éthanol de céréales.

Tableau 12 - détail du calcul d'allocation pour l'EMHV de tournesol

Etape	produit intermédiaire	Masse valorisée		PCI	Calcul	facteur d'allocation
		coproduit				
Culture -> trituration	huile brute	0,44	kg hb/kg gr	36,0	$(0,44*36)/(0,44*36+0,49*17,1)$	65%
	tourteau	0,49	kg trt/kg gr	17,1		35%
Semi-raffinage	huile neutre	0,98	kg hn/kg hb	36,0		98%
	huiles acides	0,02	kg ha/kg hb	36,0		2%
Wintérisation	huile neutre pure					100%
Estérification	biodiesel	0,99	kg bc/kg hn	37,2		94%
	glycérine	0,12	kg gl/kg hn	16,6		5%
	huiles acides	0,01	kg ha/kg hn	36,0		1%
Distribution	biodiesel				100%	100%

Tableau 13 – détail du calcul d'allocation pour l'éthanol de blé

Etapas sur lesquelles porte l'allocation	produit intermédiaire	produits sur lesquels porte l'allocation	masses valorisées	PCI	calcul d'allocation	facteur d'allocation
Culture -> Saccharification	Moût faible	Sucre utile, futur éthanol	0,60	17,0	$(0,6x17)/(0,6x17+0,3x18,2)$	65%
		Matière sèche des futures	0,30	18,2		35%

		drèches				
Fermentation (flux inhérents à cette étape seulement, les flux des étapes amont étant répartis lors de l'allocation précédente)	Vin	Ethanol	0,30	26,8	$\frac{(0,3 \times 26,8)}{(0,3 \times 26,8 + 0,3 \times 18,2)}$	60%
		Matière sèche des futures drèches	0,30	18,2	$\frac{(0,3 \times 18,2)}{(0,3 \times 26,8 + 0,3 \times 18,2)}$	40%
Distillation -> Distribution	Ethanol				100,0%	100,0%
Séchage drèches	Ethanol				0,0%	0,0%

Le détail des valeurs ainsi obtenues se retrouve filière par filière dans les tableaux « allocation » du chapitre 5.

Tableau 14 – rappel des explications ayant conduit à ces choix, tableau issu du référentiel 2008

Focus sur les choix méthodologiques relatifs aux étapes agricoles, broyage, liquéfaction, saccharification, fermentation et distillation pour l'éthanol de céréales

Sur cette problématique particulière, plusieurs approches distinctes ont été présentées par nos interlocuteurs au sein du Comité de Pilotage, qui doivent être rappelées ici.

L'approche des ONG est :

- que les charges des étapes amont de la fermentation soient réparties entre l'éthanol et les drèches sur la base des fractions amidon / non amidon.
- que les charges des étapes de fermentation et de distillation soient imputées en totalité à l'éthanol. Ceci car l'objet de la fermentation est de transformer du sucre en éthanol, et que lors de la distillation, les vinasses (qui vont donner les drèches après séchage) restent en bas de colonne de distillation et ne sont donc pas concernées par l'étape.

L'approche prônée par un industriel consiste à répartir l'ensemble des impacts environnementaux des étapes en amont de la distillation entre l'éthanol et les drèches sur la base des masses (ou contenu énergétique) de l'éthanol et des drèches. L'argument tient au fait qu'il n'y a pas de produit intermédiaire spécifique à un des deux produits dans l'usine d'éthanol. L'ensemble de la matière qui va donner les drèches d'une part et la matière qui va donner l'éthanol d'autre part sont mélangées dans un même flux. La seule séparation physique ayant lieu entre la matière donnant les drèches (les vinasses) et la matière donnant l'éthanol (les flegmes) a en effet lieu à l'issue de l'étape de distillation.

La proposition de directive et les documents relatifs aux référentiels anglais, néerlandais et allemand ne donnent pas de précisions jusqu'à ce niveau pour effectuer les prorata.

La recommandation finale arrêtée a été la suivante :

- que les charges des étapes amont de la fermentation soient réparties entre l'éthanol et les drèches sur la base du sucre utile (estimé sur la base de la stœchiométrie) pour produire

l'éthanol sortant et de la matière sèche de drèches.

- que les charges de l'étape de fermentation soient réparties entre l'éthanol et les drèches sur la base de l'éthanol et de la matière sèche de drèches*.
- que les charges de l'étape de distillation soient imputées en totalité à l'éthanol, en raison de l'objet spécifique du procédé.

Cette recommandation est en outre homogène avec la filière betterave, dont le coproduit (les pulpes) sont sorties en tête de process ; la répartition est alors effectuée entre le sucre (produit intermédiaire de l'éthanol, et contenu dans le jus vert), et le coproduit. Sachant qu'il y a une perte de masse au niveau de la fermentation (génération de CO₂ fermentaire), le CO₂ est un déchet de la réaction de fermentation, générant l'éthanol. Le CO₂ est donc un déchet de l'éthanol, et la représentation que nous recommandons pour le blé permet d'être cohérente avec ce procédé chimique.

** un test a été mené pour objectiver l'écart que ce choix crée sur le résultat. L'imputation de 100% des consommations et émissions de l'étape de fermentation au seul éthanol conduirait à ajouter 0,3 g eq CO₂/MJ d'éthanol et 0,02 MJf/MJ au bilan total, soit respectivement +0,7% et +2%. Cela reste bien plus faible que l'incertitude globale du calcul.*

3.7.3. ALLOCATIONS APPLIQUEES AUX FILIERES FOSSILES

Le diesel et l'essence sont produits lors du raffinage du pétrole brut, raffinage qui permet aussi d'obtenir un nombre conséquent de molécules. La question des allocations des dépenses énergétiques, des émissions de CO₂ ainsi que celles d'autres polluants joue donc un rôle important dans le bilan des produits fossiles.

Face à la complexité d'une modélisation de raffinerie et aux résultats peu satisfaisants obtenus par des approches étape par étape (allouer les flux de chaque étape aux sortants selon un prorata à définir), le référentiel méthodologique suggère d'utiliser les travaux de l'étude JEC 2007 en matière d'énergie consommée et d'émissions de GES. Ces derniers, par calcul incrémental sur le gasoil et l'essence, attribuent à ces productions l'écart des consommations et des émissions totales de la raffinerie résultant de cette perturbation incrémentale. Ainsi, sur le total des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ du raffinage, il est retenu respectivement pour un MJ de gazole et d'essence les valeurs ci-dessous.

Tableau 15 - Bilans EF et GES du raffinage des carburants pétroliers (Résultats de l'étude [JEC 2007])

Données de raffinage étude JEC 2007	Gazole	Essence
Consommation d'énergie	0,10 MJ / MJ	0,08 MJ / MJ
Emissions de GES	8,6 g eqCO ₂ / MJ	6,5 g eqCO ₂ / MJ

Même si cette approche diffère des allocations énergétiques mises en place pour les biocarburants, elle a été retenue en raison des limitations des approches massiques ou énergétiques et de la représentativité des raffineries modélisées.

Les émissions d'autres polluants de la raffinerie sont allouées au prorata selon les principes définis ci-dessous.

3.7.4. CAS PARTICULIER DES 3 CATEGORIES D'IMPACT NON ETUDIEES DANS LE REFERENTIEL METHODOLOGIQUE

Ce paragraphe particulier s'adresse aux catégories d'impacts non traitées dans le référentiel, à savoir la toxicité humaine, l'eutrophisation, et l'oxydation photochimique. De plus les émissions peuvent être liées à des problématiques différentes et des produits qui ne sont pas des coproduits des filières carburant. Il est donc nécessaire de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- ▶ Sait-on à quelle étape du processus ces flux sont à attribuer ?
- ▶ Sait-on comment les répartir entre coproduits ?

Pour répondre à ces questions, les flux des molécules impactantes peuvent être découpés en trois grandes catégories :

- ▶ émissions lors de la combustion (NO_x, SO_x, CO, particules),
- ▶ émissions lors d'étapes spécifiques déterminées (fermentation par exemple, avec COV, ou distillation) ou lors de fuites d'étapes très localisées (cuves de stockage),

- ▶ d'autres enfin ont lieu de manière diffuse sur tout le site (émissions au champ de N₂O, NO_x, pesticides, fuites au niveau des vannes (hydrocarbures...)) ou de manière canalisée mais sans être pour autant clairement attribuable à un produit (DCO en station d'épuration par exemple regroupant des effluents, ou émissions vers l'air de cette étape).

Les principes suivants d'allocation ont été retenus :

- ▶ Emissions liées à une combustion : l'allocation définie précédemment pour l'énergie est pleinement cohérente et est appliquée. En général, ce calcul va de soi car ces émissions sont intégrées dans les inventaires de combustion du gaz naturel consommé.
- ▶ Emissions spécifiques et fuites diffuses attribuables : ces émissions sont attribuées à l'ensemble des produits et coproduits de cette étape selon une règle d'allocation à définir. Il s'agirait de rentrer un peu plus dans la chimie de ces émissions pour voir précisément à quel produit et comment il convient de les allouer. Les allocations énergétiques proposées et résumées dans les tableaux du paragraphe 3.7.2 peuvent être une première approximation. En effet, ces dernières résultent d'une réflexion étape par étape sur les produits bénéficiant de l'étape étudiée.
- ▶ Emissions spécifiques et fuites diffuses non attribuables: là aussi, une règle d'allocation est à définir entre étapes et entre produits. Il semble que le nombre de vannes ou autres grandeurs déterminant ces fuites ne soit pas modélisable. Comme pour les consommations d'énergie non directement reliées à une étape, il est décidé de les affecter en fonction du prorata énergétique de chaque étape. Ceci s'inscrit dans une logique où ce sont les quantités d'énergie dépensées par étapes qui traduisent le coût économique d'une étape et, surtout, les besoins d'optimisation énergétique et donc la complexité du système et les risques de fuites. Au sein de cette étape, l'allocation entre coproduits sera celle définie précédemment par les tableaux du § 3.7.2 (allocation énergétique).

Le paragraphe 4.2.3 détaillant les calculs pour les émissions de polluants de l'étape industrielle illustre l'application de ces principes.

4. MODELISATION DES FILIERES

Le présent chapitre détaille la modélisation mise en œuvre pour réaliser ces calculs. Il reprend les éléments fondamentaux comme les sources de données, leur représentativité, les hypothèses clés faites pour la modélisation. Les inventaires utilisés sont également soulignés, de même que brièvement les données prises en compte pour le calcul du bilan global.

Pour plus de détails sur les données d'entrée, une annexe spécifique leur est dédiée (annexe 2), donnant la liste et les valeurs utilisées filière par filière. **Certaines valeurs ont été données sous forme de plage afin de respecter le secret industriel, conformément aux conventions adoptées en début d'étude.** Les valeurs énergétiques transversales (PCI des produits, valeurs des inventaires,...) figurent aussi dans l'annexe 3. L'annexe 4 fournit, quant à elle, l'ensemble des inventaires unitaires utilisés, ainsi que leurs sources et valeurs sur les 5 indicateurs suivis. En raison de cette transparence complète sur les calculs réalisés et des éléments détaillés figurant dans le référentiel 2008, seules les généralités et hypothèses nécessaires à la bonne compréhension de la démarche figurent dans le présent chapitre.

Enfin, signalons que certaines des données ne peuvent être vérifiées aussi complètement que possible. Toutefois, comme signalé par les experts de la revue critique: " il est possible de dire que les données utilisées sont globalement appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude et l'état actuel des connaissances."

4.1. ETAPES AGRICOLES

En préambule, il est important de souligner que cette étape agricole est de loin l'étape où les émissions réelles et leur devenir – et donc leurs impacts – **sont les plus difficiles à quantifier**. Les valeurs utilisées ici sont basées sur un état actuel et parfois bibliographique de la situation (apports d'éléments traces, niveau de toxicité des produits phytosanitaires). Cet état est donc susceptible d'évoluer avec l'amélioration des connaissances précises des phénomènes en jeu, ou par la modification des pratiques de travail, non encore intégrées dans certains facteurs d'émission agrégés (ex : démarches volontaires des agriculteurs, bandes enherbées, conditionnalité des aides PAC, plan éco-phyto).

4.1.1. DONNEES UTILISEES ET REPRESENTATIVITE

Il a été décidé d'appuyer la quantification réalisée à travers cette étude sur des données de niveau régional afin de disposer d'un échelon intermédiaire suffisamment fin en ligne avec l'approche que souhaite promouvoir la directive sur les énergies renouvelables. Les régions prises en compte représentent plus de 80% de la production du territoire national pour la filière agricole considérée. Seules certaines filières pour lesquelles la production est répartie sur une part importante du territoire ont aussi fourni des données moyennes pour la France (cas des oléagineux).

Afin de fournir une valeur représentative de la situation française, les résultats présentés dans ce rapport ont été élaborés en cherchant à se rapprocher autant que faire se peut de la réalité des origines de provenance des matières premières agricoles. Ainsi, une moyenne pondérée par la part estimée des régions dans les approvisionnements des sites en place a servi de donnée d'entrée aux calculs réalisés dans cette étude. Le tableau 16 résume par filière la construction des données

agricoles utilisées dans ce chiffrage « France ». Une analyse de sensibilité sur ce paramètre sera conduite au chapitre 7.

Tableau 16 – Couverture géographique des données utilisées

	bassin approvisionnement	Pondération utilisée	Sources de la pondération
Blé	Moyenne pondérée des principales régions françaises	Centre : 9% Champagne : 22% Haute-Normandie : 28% Ile-de-France : 10% Picardie : 14% Lorraine : 17%	TEREOS et Estimation BIO
Maïs	Moyenne pondérée des principales régions françaises	100% région Aquitaine	ABENGOA
Betterave	Moyenne pondérée des principales régions	Picardie : 50% Champagne : 50%	Estimation BIO
Canne à Sucre	National	Moyenne Brésil	(MACEDO)
Colza, Tournesol	National	Moyenne France	PROLEA
Soja	Moyenne pondérée de 2 bassins nationaux de production	USA : 33% Brésil : 67%	OilWorld
Palme	Moyenne pondérée de 2 bassins nationaux de production	Malaisie : 60% Indonésie : 40%	OilWorld

Exemple de calcul :

Les pondérations entre les itinéraires techniques des différentes régions ont été appliquées de la manière suivante (exemple donné pour le rendement):

Donnée de rendement Betterave utilisée comme représentatif France = 50% x rendement Picardie + 50% x rendement Champagne

Menés pour chaque paramètre de l'itinéraire technique pris en compte, ces calculs permettent de créer un itinéraire technique représentatif des origines des matières agricoles utilisées dans la production actuelle de biocarburant.

Les données agricoles France des productions ont été fournies par les trois instituts techniques membres du comité technique de cette étude, à savoir ARVALIS (céréales), le CETIOM (oléagineux), et l'ITB (betterave). La majorité d'entre elles proviennent des données annuelles ou des enquêtes « pratiques culturales » réalisées par le SSP, service statistique du ministère de l'agriculture. Certaines sont construites à partir de données issues de réseaux d'exploitation suivies au sein de ces structures (consommation de fioul par ha notamment). Des valeurs moyennes sur les dernières années ont été privilégiées à partir de trois grands types de sources de données :

- les données issues des enquêtes annuelles du service statistique du ministère de l'Agriculture (SSP) comme le rendement,

- les données rassemblées avec l'enquête « pratique culturale » pluriannuelle, mais plus poussées quant aux intrants suivis (engrais, produits phytosanitaires, consommation de carburant, irrigation, CIPAN,...),
- les données construites par les instituts à partir de différents travaux et de réseaux de fermes (consommation de carburant, itinéraires techniques) ont servi à combler les quelques manques ou à croiser les données.

Les filières d'importation sont élaborées à partir de données bibliographiques, construites elles à partir de données moyennées sur plusieurs années et sur une zone géographique assez large. On peut cependant noter la plus grande difficulté à avoir un regard critique sur la robustesse et la représentativité de ces données.

Les éléments suivants sont pris en compte pour les calculs ACV :

Tableau 17 – Paramètres pris en compte pour cette ACV :

Consommation		Emissions	
rendement Grains (à humidité connue)	kg grain/ha	Amortissement énergétique	kg matériel/ha/an
Engrais N minéral (doses épandues)	kg N /ha	Emission N ₂ O au champ	kg N /ha
Engrais N organique (doses épandues)	kg N /ha	Emission NH ₃ au champ	kg N /ha
N dans les résidus de culture précédent	kg N /ha	Emission NOx au champ	kg N /ha
N dans les résidus de la culture étudiée	kg N /ha	Emission Pesticides air	kg m.a./ha
Engrais P ₂ O ₅ (quantité exportée)	kg P ₂ O ₅ /ha	Emission Pesticides sol	kg m.a./ha
Engrais K ₂ O (quantité exportée)	kg K ₂ O/ha	Emission Pesticides eau	kg m.a./ha
Amendements	kg/ha	Emission Nitrates au champ	kgN/ha
Produits phytosanitaires	kg m.a./ha	Emission Phosphate au champ	kgP/ha
Semences	kg/ha	Emission Eléments traces champs	kg apports/ha
Mécanisation (diesel)	l/ha	Emission COV au champ	kg/ha
Séchage (électricité)	MJ/t grain	Changement d'Affectation des Sols	kgCO ₂ eq/ha
Soufre	kg/ha		

L'impact de chaque intrant est calculé à l'aide d'inventaires de cycle de vie, majoritairement issus d'ECOINVENT. Certains ont été modifiés ou élaborés par BIO. La liste détaillée de l'ensemble des inventaires utilisés figure en annexe 4.

4.1.2. HYPOTHESES DE MODELISATIONS

Le protoxyde d'azote et les apports d'engrais minéraux sont les postes connus pour être les plus impactants de l'étape agricole en matière de consommation d'énergie non renouvelable et d'émission de gaz à effet de serre. Leur modélisation est donc un point extrêmement sensible. Les paragraphes ci-après détaillent les choix effectués pour cette ACV. Chaque paragraphe commence par un rappel des recommandations du référentiel. L'étape agricole est aussi le lieu d'émission vers l'air, l'eau et le sol, de matières eutrophisantes et toxiques. Les modélisations des pesticides, des apports d'éléments trace, et du lessivage sont également détaillées.

4.1.2.1 Protoxyde d'azote

➤ **Recommandations du référentiel :**

Dans le cadre de cette étude méthodologique, l'approche suivie est de recommander l'utilisation de facteurs d'émissions présentant un niveau de consensus et une transversalité les plus importants possibles, à savoir ceux du GIEC, dans l'attente d'une actualisation des facteurs d'émissions ou du développement d'un modèle actualisé, validé et reconnu au niveau international dans la même mesure que le GIEC. Malgré les intérêts d'un modèle spécifique comme DNDC dans sa version utilisée par l'étude JEC 2007, modèle qui a été calibré en moyenne européenne et qui permet de prendre en compte un certain niveau de réalité des types de sol, climats et pratiques de travail du sol, paramètres importants du niveau d'émission, il a été préféré une approche prudente en restant sur un mode de calcul officiel dans l'attente de modèles suffisamment reconnus et adaptés à la France.

Ainsi, il est proposé de tenir compte, dans les ACV sur les filières agricoles, des émissions directes et indirectes de N_2O , sur la base des facteurs d'émissions suivants :

- ▶ **Facteur d'émissions directes** : 1 % kgN_2O-N/kg N apportés sur l'année ou présent dans les résidus
- ▶ **Facteur d'émissions indirectes** : 0,75 % kgN_2O-N/kg NO_2-N de l'azote lessivé, et 1 % kgN_2O-N/kg NH_3-N de l'azote volatilisé.

Il est souligné que l'utilisation des facteurs d'émissions proposés est une solution qui permet de ne pas pénaliser ou avantager une filière par rapport à une autre, en utilisant des facteurs d'émissions par filière dont la représentativité et la reconnaissance à un niveau international ne seraient pas assurées. Il s'agit d'une approche par défaut, dans l'attente de facteurs d'émissions correspondant spécifiquement au contexte français.

Le N_2O pouvant contribuer d'une manière très significative aux bilans environnementaux des filières, il est recommandé, dans le cadre des ACV des filières agricoles, de conduire systématiquement des analyses de sensibilité des résultats sur les paramètres ayant une influence sur la contribution du N_2O au bilan environnemental : facteurs d'émissions et apports azotés (rapportés à une quantité de biomasse produite).

➤ **Mise en œuvre de cette recommandation dans cette étude :**

Deux points ont cependant fait l'objet d'adaptations, comme proposés par le GIEC au sein des approches Tier 2 :

- ▶ Le lessivage de l'azote a été adapté à des données plus représentatives des mesures existantes en France (notamment essais Thybie de l'INRA).
- ▶ Les quantités d'azote contenues dans les résidus (racines incluses) ont été estimées sur la base de données françaises pour le blé, le maïs et le colza.

De plus, il est à souligner que les facteurs proposés par le GIEC permettent le calcul d'inventaires nationaux, dont la préoccupation n'est pas celle de donner une valeur par filière agricole.

Ainsi, le GIEC demande de tenir compte de la présence d'azote participant aux émissions de N₂O dans les résidus de culture, en demandant de tenir compte des résidus de l'année étudiée. La présente étude a fait une lecture stricte de ce point et a affecté à la culture étudiée les émissions directes de ses propres résidus, considérant qu'une fois en place, la culture produit ses résidus et qu'elle est donc responsable de leur émission. Ce point de vue peut être discuté et il aurait pu être aussi envisagé d'allouer les émissions de cet azote à la culture suivante, qui bénéficiera (en partie) de cet azote.

Il est dommageable qu'un des points clés d'émission de gaz à effet de serre soit entaché de tant d'incertitude quand à son niveau réel d'émission. **Devant ces difficultés à trouver des valeurs d'émission qui fassent consensus et dans l'attente de mesures d'émission ou de simulations plus adaptées aux régions françaises, la présente étude adopte une position prudente en restant dans une lecture assez proche des travaux du GIEC, avec des valeurs d'émissions plutôt dans la fourchette haute des émissions mesurées aux champs.**

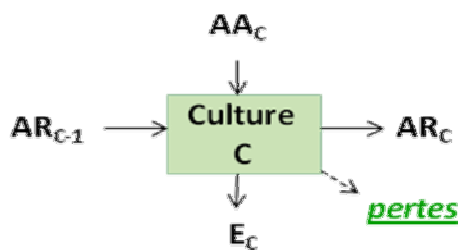
Le tableau 19 récapitule les valeurs utilisées pour les calculs et pour l'analyse de sensibilité.

4.1.2.2 Engrais

➤ Rappel du référentiel 2008 :

Le cycle de l'azote est un cycle complexe, dont la particularité de l'azote réside dans son instabilité. Avec une approche ACV qui cherche à allouer à une culture donnée ses propres impacts, il est nécessaire de chercher à attribuer les pertes par volatilisation et lessivage d'un apport d'azote à la culture considérée. Le diagramme ci-dessous présente la modélisation des flux d'azote utilisé dans cette étude :

Figure 4 - Modélisation des flux de nutriments N



Quantité d'N imputable à la biomasse récoltée :

$$\{E_c + \text{pertes}\} \text{ est environ égal à } \{AA_c + AR_{C-1} - AR_C\}$$

« AR » représente l'azote des résidus de culture du précédent et de la culture étudiée. Le flux « AAc » comprend les apports d'azote minéraux et organiques, tandis qu'Ec représente l'export par la culture. Ce bilan simplifié s'appuie sur ces grandeurs, car elles jouent un rôle prépondérant dans le bilan. Mais il est nécessaire de noter que ce bilan est une simplification de la réalité, les transferts réels d'azote entre culture – résidus – sols – atmosphères n'étant pas tous intégrés. Ainsi, ce bilan n'est pas forcément équilibré pour chaque culture, notamment en raison de l'estimation des apports du sol à la plante via l'unique paramètre des résidus de culture du précédent, alors que la mobilisation de l'azote est plus compliquée et pluriannuelle à partir de l'ensemble des composants du sol.

A partir de ce bilan simplifié, parmi les trois niveaux d'approches possibles proposés dans le référentiel, le niveau 1 (*Supposer que $AR_C = AR_{C-1}$*) n'a pas été retenu. En effet, cette hypothèse n'est acceptable que si les cultures en rotation cèdent des quantités d'azote comparables via leurs résidus,

ce qui n'est pas le cas avec la betterave. C'est donc l'approche de niveau 2 décrite ci-dessous qui a été appliquée.

Niveau 2 : Prendre en compte le contenu en azote des résidus de culture

Ceci permet de quantifier la grandeur $AR_C - AR_{C-1}$. La quantité d'azote imputable à la culture C est alors : $EC + pertes = AAC + AR_{C-1} - AR_C$. Ce deuxième niveau de précision permet de prendre en compte le fait que certaines cultures cèdent plus d'azote que d'autres aux cultures suivantes. Cependant, le calcul repose sur l'approximation que la totalité de l'azote contenu dans les résidus est valorisé par les cultures suivantes.

Ainsi, le différentiel d'azote contenu dans les résidus du précédent et de la culture étudiée a été ajouté aux apports d'engrais minéraux azotés. Cela revient à considérer que cet azote se substitue à un apport minéral. Ce redécoupage des apports entre cultures est neutre sur une rotation, les cultures bénéficiaires nettes et excédentaires se compensant. Le tableau ci-dessous illustre le calcul réalisé pour estimer le résidu moyen précédant un blé à partir des principales cultures précédentes.

Cultures précédentes du blé	Surface France (ha)	Source	Azote résidus (kg N/ha/an)	Azote des résidus (kg N/an)
Tableau 18 – Estimation du résidu moyen d'un précédent de blé				
betterave	440 000	AGRESTE	132	58 080 000
tournesol	520 000	AGRESTE	33	17 160 000
colza	1 600 000	AGRESTE	60	96 000 000
Céréales à paille et maïs	1 800 000	AGRESTE+estim. BIO	50	90 000 000
TOTAL	4 360 000			261 240 000
Azote moyen des résidus d'un précédent de blé (par hectare de blé)			60,0	

Tableau 19 – Synthèse de la modélisation de l'azote et des données utilisées.

Quantité en kg N /ha	Formules	blé	maïs	betterave	canne à sucre	colza	tournesol	soja	palme
Engrais N minéral (doses épandues)	A	173,7	188,9	97,3 ²	60,0	164,4	38,0	7,0	156,0
Engrais N organique (doses épandues)	B	8,5	44,4	32,6	36,7	24,0	0,0	0,0	42,0
N lessivé	C	40,0	40,0	17,7	20,0	40,0	40,0	10,0	40,0
culture précédente considérée	D	moyenne pondérée colza, tournesol, betterave, céréales à paille et maïs	maïs	céréale à paille = résidus blé	Canne à sucre	céréale à paille = résidus blé	céréale à paille = résidus blé	céréale à paille = résidus blé	Palme
N des résidus de la culture précédente	E	60	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	0,0
N des résidus de la culture étudiée	F	50,0	50,0	132,0	50,0	60,0	33,0	39,0	0,0
Apports net d'engrais minéraux	A + E – F	183,7	188,9	15,3	60,0	154,4	55,0	18,0	156,0
Quantité d'azote émetteur direct de N ₂ O	A + B + F	232,2	283,3	261,9	146,7	248,4	71,0	46,0	198,0
Emission N_ Nitrates au champ	C	40,0	40,0	17,7	20,0	40,0	40,0	10,0	40,0
Emission N_NH ₃ au champ	G = (A+B)*FE_NH ₃	9,7	14,8	8,8	7,4	11,1	1,9	0,4	12,8
Emission totale N_N ₂ O au champ	(A+B+F)*FE_N ₂ Odirect + C*FE_N ₂ O_NO ₂ + G*FE_N ₂ O_NH ₃	2,7	3,3	2,8	1,7	2,9	1,0	0,5	2,4

² Notons que pour la betterave, le bilan azoté ne boucle pas si l'on applique la formule proposée en figure 4. Cela résulte des limites expliquées précédemment : la formule utilisée est une approche simplifiée, qui ne tient pas compte des transferts pluriannuels de l'azote dans le sol et de la mobilisation de l'azote résiduel ainsi formé en complément de la culture précédente.

Deux autres estimations de niveaux d'émissions de N₂O au champ ont été utilisées dans ce rapport. Elles sont présentées dans des tableaux de mise en perspective avec les résultats pour chaque filière (voir les résultats des filières). Ces calculs sont issus de valeurs utilisées dans l'étude JEC ou d'une application sans aucune adaptation aux valeurs françaises des valeurs par défaut du GIEC. Le tableau ci-dessous détaille les calculs réalisés pour estimer les niveaux d'émissions pris dans ces deux configurations.

Quantité en kg N /ha	Formules	Blé	maïs	betterave	canne à sucre	Colza	tournesol	soja	palme
MODELISATION DES EMISSIONS DE N₂O (JEC)									
Apports net d'engrais minéraux	A + B	182,2	233,3	129,9	96,7	188,4	38,0	7,0	198,0
Emission totale N ₂ O au champ	(A+B)*FE_N ₂ O_JEC	1,9	3,5	2,3	3,8	2,7	0,9	0,2	3,5
FE_N ₂ O_JEC estimé	%	1,05%	1,50%	1,75%	3,90%	1,43%	2,34%	2,30%	1,76%
MODELISATION DES EMISSIONS DE N₂O (GIEC)									
lessivage	(A + B) * 0,3	54,6	70,0	39,0		56,5	11,4	2,1	59,4
N des résidus de la culture étudiée	F	100,0	90,0	132,0	non calculé ³	90,0 ⁴	33,0	39,0	0,0
Emission totale N ₂ O au champ	(A+B+F)*FE_N ₂ Odire ct + C*FE_N ₂ O_NO ₂ + G*FE_N ₂ O_NH ₃	3,3	4,1	4,1	non calculé	3,7	1,4	1,1	2,1

³ Cette filière n'a pas été estimée car ne disposant pas de données du GIEC et de suffisamment de bibliographie.

⁴ Le GIEC ne disposant pas de valeur standard pour cette culture, c'est une valeur haute des estimations de l'azote des résidus d'un colza qui a été utilisée

4.1.2.3 Modélisation des produits phytosanitaires

Les types de produits phytosanitaires sont nombreux et agissent de façon spécifique, avec des effets cocktails et d'accumulation complexes. Peu de modèles existent ayant tenté de quantifier ces impacts dans une unité qui permette l'agrégation à travers un indicateur global de toxicité. Ayant choisi CML comme modèle de caractérisation des risques, le nombre de molécules disponibles se restreignait. Les deux phases de quantification nécessaires à une ACV ont été menées comme suit :

- ▶ Pour les données amont d'apports en produits phytosanitaires et de fabrication : il a été décidé en première approximation de travailler sur une quantité globale de matière active apportée à l'hectare. Les instituts techniques ont fourni cette information en kg de matière active/ha. La fabrication de cette matière active a été modélisée par l'inventaire ECOINVENT « pesticide moyen » pour les émissions liées à sa fabrication.
- ▶ Partie devenir des molécules et risques environnementaux associés : les émissions de ces matières actives ont été réparties entre compartiments à l'aide du travail réalisé pour la Commission par Buwal dans le rapport « Harmonisation of environmental Life Cycle Assessment for agriculture. European Commission 2003 », qui propose comme modèle de niveau 1 un facteur de 10% des matières épandues vers l'air, et de 0,5% vers les eaux de surfaces (0% à quelques exceptions vers les eaux souterraines). Malgré la diversité des traitements, la majorité du produit apporté se retrouve dans le sol ou dans la plante, dont une partie non négligeable reste ou retourne aux champs. Il est donc estimé que 50% des matières apportées se retrouvent dans le sol, la différence étant exportée ou détruite par les conditions climatiques.
- ▶ Une fois les quantités connues d'apport réel dans les différents compartiments, le niveau de risque a été estimé à partir des facteurs de caractérisation CML du carbofuran. Cette molécule, bien qu'interdite à l'usage depuis le début 2009, a été choisie comme matière active de référence car elle présentait des niveaux de toxicité estimés médian. Cela a été croisé avec les informations AGRITOX, la base de notification des analyses toxicologiques des pesticides, afin de corroborer son comportement relativement « médian » par rapport à l'ensemble des matières actives et donc son choix comme molécule de référence. On parlera donc « d'équivalence-carbofuran ».

Il a été rajouté dans les inventaires deux lignes introduisant ces émissions possibles, ainsi que leurs facteurs de caractérisation dans CML. Il est important de souligner qu'un tel choix n'est issu que des difficultés à collecter suffisamment d'information développée de manière cohérente dans un modèle de caractérisation des risques. Si ce poste s'avérait majeur sur l'indicateur toxicité, ce qui sera discuté dans la partie résultat, ces choix de modélisation limiteraient a minima la comparaison entre filières agricoles sur cet indicateur.

Tableau 20 –Données issues d'AgriTox pour le Carbofuran.

AgriTox	toxicité voie orale	Dose journalière acceptable	Vitesse dégradation au champ
	DL50 sur rat	mg/lk/jour	DT 50
Carbofuran	18 mg/kg	0.001	30

4.1.2.4 Modélisations des apports d'éléments traces

Ne disposant pas de données précises sur la composition moyenne en éléments traces des fertilisants et des produits phytosanitaires, la valeur d'émission en éléments traces de l'ammonitrate communiqué par Buwal dans l'étude « *Harmonisation of environmental Life Cycle Assessment for agriculture. European Commission 2003* » a été utilisée. Il est fait l'hypothèse que ces valeurs sont représentatives des apports de minéraux de synthèse. Cet inventaire par kg de nutriment est donc multiplié par la quantité d'engrais totaux apporté. La aussi, une analyse de sensibilité sera nécessaire afin de cerner l'impact potentiel de cette incertitude dans les résultats.

4.1.2.5 Autres émissions vers l'air et l'eau

Les facteurs suivants ont été intégrés pour quantifier les flux vers les divers compartiments. Il est important de souligner que parmi les quantifications de flux, ces facteurs ont probablement l'incertitude la plus importante du fait de la complexité des phénomènes et des difficultés de mesures. Les modélisations des éléments traces et des produits phytosanitaires sont particulièrement à considérer avec prudence, et ce d'autant plus que l'effet des bandes enherbées n'a pas été pris en compte du fait de l'absence de données. Cet effet devrait contribuer à réduire la quantité de phytosanitaires lessivée vers les eaux de surface. Cet élément sera testé en sensibilité. Les valeurs N₂O sont aussi bien entendu à considérer avec précaution. Toutefois disposant d'une modélisation de référence comme celle du GIEC, le sujet possède une base commune que n'ont pas les modélisations comme celle des phytosanitaires.

Tableau 21 – Synthèse des facteurs d'émission agricole

Emissions de :	Facteurs d'émission	Unités et commentaires	Source
NH ₃	5,0%	Par N minéral apportée (kg N_NH ₃ / kg N)	CORPEN
	12,0%	Par N organique apportée (kg N_NH ₃ / N)	
SOx	0,0%		CITEPA
COV	0,0%	Considéré non modélisable en l'état et probablement peu variable sous l'hypothèse de non changement d'affectation des sols (déboisement surtout)	Synthèse bibliographique BIO
NOx	1,0%	Culture d'hiver : kg N_NOx/kg N	INRA
	2,0%	Culture de printemps (kg N_NOx/kg N)	
Eléments trace		Apports calculés à partir des apports engrais et pesticides	Concerted Action AIR3-CT94-2028 Ammonitrate 30%
	100%	Part arrivant dans le sol estimée à 100%	estimation BIO
	0,5%	Taux forme ionique des éléments traces : n'étant pas en mesure de différencier tous les métaux et tous les pH de sols, un taux d'ionisation moyen pour des sols de pH entre 6-9	Estimation BIO basée sur environmental ecology, B. Friedman
Produits phytosanitaires	10,0%	Emission dans l'air, estimation moyenne, (kg matière active / kg apporté de matière active)	CORINAir

Emissions de :	Facteurs d'émission	Unités et commentaires	Source
	50,0%	Estimation BIO, dont le poids sera vérifié par analyse de sensibilité	BIO, sur le principe que la majorité des apports se retrouvent dans la plante, et donc les résidus, et dans le sol.
	1,0%	Lessivage par les pluies vers eaux de surfaces	Estimation BIO à partir de données bibliographiques
		L'intégration par les plantes n'est pas prise en compte.	
CH ₄	0,0%	Les sols sont considérés globalement neutres en termes d'émission de CH ₄ : ils captent autant qu'ils émettent en moyenne.	Bibliographie
	0,0%	Pas d'émission supplémentaire pour les apports organiques (hypothèse d'un épandage sur sol sec à des doses moyennes)	Estimation BIO et validation instituts techniques
N ₂ O	1,0%	- les émissions directes sont évaluées à 1% du total des apports de N, inclus résidus de culture	FE GIEC pour les réémissions de N ₂ O
	0,75%	% du N lessivé (NO ₂ ⁻), (estimé à 30% des apports par au GIEC)	FE GIEC
	1,0%	% du N volatilisé (NH ₃ + NOx), (estimé à 10% des apports dans au GIEC)	FE GIEC
Nitrates	40 unités d'azote en général	Valeur par culture selon études localisées en France + Dire d'expert sur leur représentativité.	Site de mesures THIBIE
Phosphates	0,1 kg/ha/an	En kg P/ha/an - Pertes faibles, par ruissellement uniquement (avec la terre érodée). calcul BIO : 0,06 kg P/ha/an).	Estimation BIO basée sur des données d'érosion, arrondie au niveau supérieur

4.1.2.6 Amortissement énergétique du matériel agricole

Il est important de souligner que l'amortissement de ce matériel n'a pas été pris en compte dans les calculs ici présentés. Ce choix se justifie par la difficulté à réaliser une prise en compte cohérente et robuste pour l'ensemble des filières étudiées et ce à toutes les étapes. Les questions d'allocation rajoutent de plus un élément de complexité à la quantification. Ce choix est issu de la recommandation du référentiel 2008. Comme rappelé ci-dessous, l'impact ici négligé l'est d'abord par la difficulté de modélisation suffisante des raffineries et ensuite par l'application de la règle de coupure (poids potentiel de quelques pourcents dans le bilan Energie non renouvelable surtout).

➤ Rappel des recommandations du référentiel :

Les recommandations élaborées pour l'enjeu méthodologique de l'amortissement énergétique sont distinguées selon que l'ACV a un but comparatif ou non.

Dans le cadre d'une ACV non comparative des filières biocarburants, il est pertinent de s'attacher à prendre en compte, sur la base des meilleures données disponibles, les amortissements des matériels et infrastructures agricoles. La méthodologie et les référentiels utilisés dans ces évaluations devront être explicités.

Dans le cadre d'une ACV comparative, l'insuffisance des données disponibles sur la filière pétrolière de référence suggère de ne pas pénaliser par défaut les filières agricoles et de ne pas prendre en compte les amortissements énergétiques des matériels et infrastructures des filières agricoles, dans un souci d'homogénéité des périmètres comparés. Cette recommandation pourra néanmoins être actualisée si des données nouvelles venaient à démontrer le caractère négligeable des amortissements des infrastructures des filières pétrolières.

4.2. ETAPES DE PRODUCTION DU BIOCARBURANT

Cette étape, parfois nommée simplement « étape industrielle » dans la suite du rapport, recouvre l'étape de transformation des matières premières en carburant au niveau des bioraffineries. Sur un site fermé et très encadré, les éléments de modélisation sont ici plus directs et plus faciles à quantifier à partir des données connues par les industriels exploitants ces sites.

4.2.1. REPRESENTATIVITE DES PROCEDES MODELISES

Un premier travail a consisté à analyser les filières en place pour cerner les grands types de procédés en production ou en devenir, et ainsi valider des hypothèses de regroupement et de modélisation qui permette un chiffrage représentatif de la situation française.

Conduit sur la base d'enquête auprès des industriels avec un volet prospectif, il a permis de valider les procédés majoritaires dans le paysage français pour les cinq prochaines années. Ceux-ci sont mentionnés dans le tableau de la section suivante. **Les résultats principaux pour chaque biocarburant, portant l'intitulé « filière principale » dans les tableaux de résultat, sont issus de la quantification de ces procédés de référence.**

Notons que pour les biocarburants à base d'huile, la voie esters éthyliques (EEHV) n'a pas été intégrée, car encore trop expérimentale pour donner une image fidèle de son potentiel à maturité.

4.2.2. SOURCES DE DONNEES

➤ Données d'entrée :

La majorité des données d'entrée des sites de production de biocarburant ont été fournies par les principaux acteurs industriels du secteur. Le tableau suivant résume l'origine des données, les procédés principaux quantifiés, ainsi que les sous-filières considérées.

Tableau 22 – Procédés représentatifs et sources des données d'entrée

Type de biocarburant	Procédé de référence : « filière principale »	Autre sous filières	Transmis par, partie agricole	Transmis par, partie industrielle
EMHV Colza EMHV Tournesol EMHV SOJA	Catalyse homogène, lavage à l'eau (environ 78% de la production française)	Catalyse homogène, distillation (13% de la production française)	CETIOM CETIOM Bibliographie	PROLEA PROLEA PROLEA
EMHV huile de palme	Catalyse homogène, raffinage physique, lavage à l'eau	/	Bibliographie + validation CIRAD	PROLEA + BIOCAR
EMGA	Catalyse homogène, distillation	/	/	SARIA
EMHAU	Catalyse homogène, lavage à l'eau	/	/	VEOLIA
HVP	Presse à froid, 7kW	/	CETIOM	Bibliographie + FNCUMA
Ethanol Blé	Dry mill, sans cogénération Gaz Naturel ⁵ (30% du total France)	Dry mill, avec cogénération gaz naturel (70% du total France)	ARVALIS	TEREOS
Ethanol Betterave	Attenante sucrerie, avec cogénération (85%)	Attenante sucrerie, sans cogénération (15%)	ITB	CRISTAL-UNION
Ethanol Maïs	Dry mill, sans cogénération	/	ARVALIS	ABENGOA
Ethanol Canne à sucre	Attenante sucrerie, avec cogénération	/	Bibliographie + validation CIRAD	Bibliographie + validation TEREOS
ETBE	Moyenne pondérée entre : Voie RAFFINERIE (25%) Voie CHIMIQUE (75%)	/	//	TOTAL LYONDELLBASELL

Les émissions vers l'air et l'eau ont été estimées à partir des données du registre des polluants institué depuis fin 2006 et en ligne depuis cette date. Ce registre, s'appuyant sur les principes des arrêtés des Installations Classées, répertorie les molécules émises vers l'environnement dont les flux dépassent des seuils prédéfinis d'émission. Ainsi, il offre une base de données officielle et fiable des principaux flux pouvant présenter des risques. Le détail des inventaires d'émission ainsi construit est donné dans le paragraphe suivant.

➤ Production des intrants

Comme pour la partie agricole, l'impact de mise à disposition des intrants est quantifié à l'aide d'inventaires issus d'ECOINVENT. Deux inventaires ont été mis à jour sur la base de données plus

⁵ Malgré sa plus faible représentativité, cette voie a été placée appelée filière principale car elle découle directement des données transmises par l'industriel sur une année où la cogénération n'a pas été utilisée. L'autre voie est donc une reconstitution par BIO à partir d'hypothèses sur la cogénération. Ce choix permet aussi une comparaison plus directe avec la filière maïs. Enfin, cela se justifie dans la mesure où les écarts restent marginaux entre sous-filière avec et sous-filière sans cogénération Gaz Naturel.

récentes concernant l'énergie fossile et les émissions de gaz à effet (inventaire de l'ammonitrate et inventaire du P₂O₅). L'inventaire de la combustion d'un kg de diesel dans une machine agricole a été reconstitué à partir de l'inventaire ECOIVENT du diesel et des émissions répertoriées dans les rapports descriptifs d'ECOIVENT pour la combustion dans un tracteur.

Les données d'entrée principales prises en compte sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 23 – types de paramètres pris en compte

Types de données	principaux produits rencontrés
Rendements	éthanol/kg grain, DDGS/kg grain
Intrants chimiques	soude, hexane, méthanol, ...
Intrants énergétiques	gaz naturel, électricité, fioul, biomasse
Transports	camion, train, barges, transocéaniques, pipeline
Distribution	électricité des pompes
Emissions vers l'air et l'eau	COV, SOx, NOx, DBO, DCO, éléments traces, autres polluants

La modélisation des sous-filières avec ou sans cogénération a été réalisée grâce au calcul expliqué dans l'encadré suivant.

▪ **Calcul pour les filières secondaires avec ou sans cogénération gaz naturel**

Tout d'abord, il est important de souligner que le terme « cogénération » employé seul dans ce rapport désigne de manière générique les cogénérations aujourd'hui en place et donc majoritairement à partir de gaz naturel. Pour parler des projets futurs visant à utiliser de la biomasse en tant que source d'énergie, le présent rapport utilise explicitement les termes « chaufferie biomasse » ou « cogénération biomasse » pour qu'il n'y ait pas confusion.

Certaines filières font appel à la fois à des systèmes avec ou sans cogénération. Pour simuler ces filières et voir l'impact de ces choix techniques, nous avons reconstruit un jeu de données en modifiant les aspects énergétiques de la manière suivante :

➤ **Passage d'un fonctionnement sans cogénération vers un fonctionnement simulé avec :**

Nous sommes partis de l'énergie totale mobilisée sur le site pour sa fabrication de chaleur et avons considéré que 10 % de l'enthalpie donnée par le gaz était utilisée pour produire de l'électricité (valeur plutôt conservatrice). Nous avons appliqué un rendement de transformation de cette énergie du gaz en électricité de 80 %, valeur moyenne calculée à partir des données transmises par les industriels. Ainsi, un site qui avait besoin de 100 MW de gaz transformé en chaleur, consommerait s'il avait cogénéré de l'électricité, $100 / (1 - 10\%) = 111,1$ MW de gaz naturel, et produirait ainsi $111 * 10\% * 80\% = 8,8$ MW d'électricité. La quantité d'électricité achetée est réduite d'autant.

➤ **Passage de données avec cogénération vers une filière simulée sans (cas de la betterave):**

Le passage est dans ce cas direct, l'ensemble des éléments ayant été communiqué à BIO pour faire un calcul sur situation réelle. L'énergie gaz consommée pour produire l'électricité est défalquée du

bilan. La quantité équivalente d'électricité qui était produite à partir de ce gaz est alors rajoutée à la ligne « électricité achetée ».

4.2.3. HYPOTHESES PRINCIPALES

En complément de ces données, diverses hypothèses ont été faites pour réaliser ces analyses. Les principales d'entre elles sont regroupées ci-dessous.

4.2.3.1 Amortissement énergétique du matériel des sites industriels

Il n'a pas été pris en compte l'amortissement des immobilisations des sites industriels, conformément à la recommandation du référentiel dans le cadre d'ACV comparatives. En revanche, il convient de souligner que les amortissements ont été laissés lorsque disponibles (cas des inventaires ECOINVENT utilisés pour les intrants). Les intrants industriels, l'énergie, le pétrole brut ou le gaz naturel mis à disposition ou brûlé, ainsi que les transports, ont donc des amortissements énergétiques intégrés.

4.2.3.2 Elaboration des inventaires d'émission des bioraffineries

Les émissions principales des bioraffineries sont de 3 ordres :

- ▶ les émissions liées à la combustion,
- ▶ les émissions de COV liées aux intrants, à la fermentation, aux produits,
- ▶ les émissions vers l'eau.

Les premières ont été modélisées en utilisant l'inventaire d'ECOINVENT « combustion de gaz naturel en Chaudière », sur la base des données de consommation d'énergie fournie par les acteurs industriels. L'écart reste faible avec les valeurs proposées dans les rapports de déclaration de polluants, qui utilisent les facteurs d'émission CITEPA pour les 4 polluants suivis (SO_x, NO_x, CO₂, poussières).

Les émissions de COV ont été estimées à partir de données déclarées aux DRIRE pour le registre des polluants. Le site Internet du registre des polluants, qu'on appellera par raccourci « iREP », a été utilisé pour obtenir ces données⁶. Les valeurs 2007 des sites étudiés ont été retenues lorsque estimées représentatives (vérification des évolutions par rapport à l'évolution du site et de ses technologies). Malheureusement, les données d'émissions vers l'eau ne sont pas disponibles pour 2007 pour l'ensemble des sites étudiés, il a donc fallu se rabattre sur les niveaux d'émissions 2006.

Les données du site d'Arcis sur Aube ont été utilisées pour modéliser le niveau d'émission des éthanoleriers.

⁶ <http://www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php>

3 sites de fabrication SAIPOL/DIESTER Industrie ont été étudiés (Sète, Grand-Couronne, Compiègne). Disposant du maximum d'information pour Grand-Couronne et ayant vérifié la cohérence dès que possible avec les autres sites, c'est celui-ci qui a servi à élaborer cet inventaire d'émission. Les données de Grand-Couronne n'ont toutefois pas été utilisées pour le méthanol, ce site ne disposant pas de torchère pour brûler ces émissions alors que la majorité des sites en sont équipés (point corroboré par la non déclaration du méthanol pour les autres sites). La valeur fournie par DIESTER Industrie a alors été utilisée (0,008 kg de méthanol vers l'air/t ester) et est corroborée pour les données disponibles sur les autres sites. Les quantités émises ont été allouées conformément aux recommandations faites dans la partie méthodologie, et rappelées dans la partie qui suit. Comme pour l'éthanol, l'année 2007 a été utilisée pour les émissions vers l'air, et faute de données en 2007, l'année 2006 a servi pour les émissions vers l'eau.

La même approche a été utilisée pour les émissions vers l'eau, avec des données 2006 (et donc également des données de production de 2006 pour ramener au biocarburant produit). Les tableaux ci-dessous détaillent le calcul polluant par polluant.

Pour les esters méthyliques non issus directement de l'extraction de l'huile des végétaux (EMGA et EMHAU) ou ne comportant pas de phase d'extraction de l'huile à l'hexane, l'inventaire précédemment calculé est modifié pour intégrer ces différences, en mettant à 0 les émissions liées à la phase d'extraction de l'huile (hexane, phosphore de l'acide phosphorique).

4.2.3.3 Rappel des règles d'allocation proposées:

Pour attribuer des valeurs d'émission aux carburants, les émissions annuelles de l'ensemble des molécules seront réparties sur les produits avec comme règle d'allocation :

- ▶ Attribution de ces émissions à une étape si possible et donc à ses produits, avec application des règles d'allocation définies précédemment pour cette étape (voir § 3.7.2).
- ▶ Ou si l'émission n'est imputable à aucune étape, répartition du total de polluant émis par le site au prorata des GES émis pour produire une masse donnée de biocarburant sur le total des GES émis par le site.

Il est important de bien noter qu'on parle ici d'émissions de GES issues de la combustion sur le site industriel. A titre d'exemple, si les règles d'allocation sur l'énergie et le GES conduisent à calculer un niveau d'émission de combustion de 0,15 kgCO₂/kg de biocarburant (donc après allocation au coproduits selon les tableaux du § 3.7.2), et que le site déclare au total 10 000 000 kg de CO₂ émis sur l'année, il sera alloué au kg de biocarburant 0,15 / 10 000 000 des émissions des autres polluants non attribuables directement à une étape. Le tableau ci-dessous donne deux exemples de ce genre de calcul, proposant ainsi les valeurs retenues pour les émissions iREP de la production moyenne de biocarburant (colonne C). Les 2 tableaux donnent ensuite les niveaux de polluants ainsi calculés (noter que les émissions de COV sont attribuables à des étapes spécifiques).

Tableau 24- Exemples de calcul « répartition selon une allocation GES »

	Polluant totaux du site émis sur l'année (kg)	CO ₂ total émis sur le site et issu de l'iREP sur l'année considérée (kg)	CO ₂ émis sur le site pour produire une tonne de biocarburant (kgCO ₂ / t bc) (après allocation aux coproduits sur la base des règles rappelées au 3.7.2)	COV alloué au biocarburant (kg / t bc)
	A	B	C	D = A x C / B
EMHV : exemple des émissions totales de phosphore	53 900 (émissions 2006)	39 100 00 (émissions 2006)	154	0,212
Ethanol : exemple de l'azote total émis dans l'eau	297 000 (émissions 2006)	107 000 000 (émissions 2006)	500	1,39

C'est la valeur D qui est fournie dans les tableaux ci-dessous lorsque les polluants ne peuvent être attribués à une étape particulière.

Lorsque les polluants peuvent être attribués à une étape particulière, le calcul classique qui ramène équitablement à chaque unité de produit a été conduit :

	Emissions retenues	Produits en jeu	Quantité émise par t EMHV (kg/t), avant allocation entre coproduits
	A	B	C = A / B
EMHV : COV hors méthanol (hexane principalement), émis lors de la trituration	414 600 kg de COV (données 2007)	Environ 350 000 t d'huile brute triturées en 2007	1,18

Tableau 25 – Inventaire d'émission des sites d'estérification

Emissions dans l'Air (direct)	allocation retenue	valeur retenue (kg/ t EMHV)
Emissions dans l'air		Données 2007
COVNM, hors méthanol (principalement Hexane)	l'hexane est utilisé pour l'étape d'extraction	1,18 x allocation de cette étape
Dioxyde de carbone (CO ₂) total	/	calculé à partir des émissions de combustion
Méthanol (alcool méthylique)	le méthanol est émis lors de l'étape d'estérification	0,008 x allocation de cette étape
Emissions vers l'eau		Données 2006
Demande chimique en oxygène (DCO)	non attribuable à une étape : répartition selon une allocation GES	1,09
Méthanol (alcool méthylique)	le méthanol est émis lors de l'étape d'estérification	0,0232 x allocation de cette étape
Phosphore total (P)	non attribuable à une étape : répartition selon une allocation GES	0,212

Tableau 26 – Inventaire d'émission d'une éthanolerie

	allocation retenue	valeur retenue (kg / t éthanol)
Emissions dans l'air		Données 2007
COVNM	<ul style="list-style-type: none"> 80% des émissions ont lieu lors de la fermentation, Le reste est principalement issu de la distillation, pour lequel 100% est alloué à l'éthanol. 	0,3 x facteur d'allocation de l'étape fermentation 0,08
Dioxyde de carbone (CO ₂) total	/	calculé à partir des émissions de combustion
Oxydes d'azote (NO _x - NO + NO ₂) (en eq. NO ₂)	/	calculé à partir des émissions de combustion
Emissions vers l'eau		Données 2006
Azote total (N)	non attribuable à une étape : répartition selon une allocation GES	1,39
Demande chimique en oxygène (DCO)	non attribuable à une étape : répartition selon une allocation GES	43,7
Phosphore total (P)	non attribuable à une étape : répartition selon une allocation GES	0,594

4.2.4. SCENARII PROSPECTIFS DES FILIERES A 5 ANS

Cette étude intègre les évolutions potentielles à 5 ans des filières étudiées, afin de pouvoir mettre en perspective les résultats calculés à partir des technologies actuelles. Les hypothèses d'évolutions ont été construites avec les professionnels concernés. **Elles sont volontairement réalistes et modérées du fait d'un pas de temps laissant peu de place à des changements non programmés aujourd'hui.**

Les évolutions principales prises en compte portent sur :

- en matière agricole : assez peu de changements prévus à cette échéance sur les paramètres majeurs influençant les résultats. Le plus notable est une légère progression des rendements pour la betterave, le maïs, et le blé. Une diminution du lessivage par implantation de CIPAN pour certaines cultures ou maintien des repousses (colza), ainsi que l'amélioration continue des pratiques et l'augmentation des coûts des engrais justifient une légère baisse des apports d'azote (-5%) pour le colza, le tournesol, le blé et la betterave. La mécanisation a été estimée stable, l'augmentation liée à l'implantation des CIPAN devant être compensée par diverses sources de réduction (probable légère progression des non labours, baisse des traitements phytosanitaires avec le plan ECOPHYTO, renchérissement à venir des prix de l'énergie, et améliorations de pratiques).
- En matière de procédés industriels : l'évolution principale prise en compte consiste en la mise en place de cogénérations à partir de biomasse. Les filières biodiesel pensent pouvoir apporter des progrès sur l'étape d'extraction et sur le raffinage (raffinage enzymatique).

Les éléments exacts par filière peuvent être trouvés dans le chapitre 5.

4.3. FILIERE PETROLIERE

Le calcul des émissions liées à la fabrication du diesel et de l'essence est une méthodologie complexe. La diversité des coproduits d'une raffinerie, en terme d'usage, de coût, rend les questions d'allocation délicates. Plusieurs approches existent, certaines attribuant étape après étape les charges aux produits concernés (approches IFP), d'autres allouant la variation d'émission globale de la raffinerie suite à un changement incrémental des quantités produites (JEC).

4.3.1. PHASE D'EXTRACTION

Les inventaires ECOINVENT pour le pétrole brut importé en Europe ont été utilisés. Ils sont disponibles pour une gamme large de zone géographique d'extraction. L'approvisionnement réel France a servi à pondérer les origines géographiques à prendre en compte. Ces données sont issues d'inventaires annuels réalisés par l'UFIP. Le tableau ci-dessous précise les origines d'approvisionnement retenues, et les inventaires ECOINVENT utilisés.

origines des bruts	2005	2006	2007	moyenne	part retenue	ICV ECOINVENT
	en kt	en kt	en kt	en kt		
France	1082	1109	1061	1084	0%	ICV_0
Amérique	407	1159	512	693	0%	ICV_0
Proche Orient	22542	22614	20698	21951	27%	icv_petrole_Moyen Orient
Arabie Saoudite	10619	8572	7064	8752		
Iran	6893	6801	6506	6733		
Afrique	18600	17661	17767	18009	22%	ICV_petrol_afrique
Algérie	5287	3809	1787	3628	4%	ICV_petrol_afrique
Angola	4226	3340	4572	4046	5%	ICV_petrol_afrique
Lybie	4461	4107	4982	4517	6%	ICV_petrol_afrique
Nigéria	2506	4173	2542	3074	4%	ICV_petrole_nigeria
Europe	22862	20591	18154	20536	25%	ICV_petrol_UK
Norvège	16042	13306	12405	13918	17%	ICV_petrol_norvege
CEI	19705	19392	24157	21085	26%	icv_petrol_russie
Russie	9882	9521	10607	10003		
TOTAL	85198	82526	82349	83357,66667	1	
Total pris en compte				81581		

Source : UFIP et observatoire de l'énergie

4.3.2. ELABORATION DES INVENTAIRES D'EMISSION DES RAFFINERIES

4.3.3. RAPPEL : PRINCIPE RETENU DANS LE REFERENTIEL

Cette modélisation a retenu la recommandation faite dans le référentiel 2008, qui consiste à s'appuyer sur l'approche incrémentale mise en place dans l'étude JEC 2008. Les valeurs de l'étape de raffinage ainsi calculées sont rappelées ci-dessous :

Tableau 27 – Valeurs d'émission MJf et GES retenues pour le raffinage

Valeurs raffinage		MJf consommé / MJ de carburant produit	MJf consommé / t de carburant produit	g. eq CO ₂ /MJ de carburant produit	kg eq CO ₂ /tonne de carburant produit
JEC 2008	Diesel	0,100	4310	8,6	370,66
étape raffinerie	Essence	0,080	3448	6,5	280,8

source : JEC 2008

Cette étude présente l'avantage d'être bâtie sur la modélisation d'une raffinerie moyenne européenne. Ce choix permet de plus une comparaison plus directe avec l'étude JEC.

Cette énergie consommée a été supposée provenir pour 50% de résidus du raffinage et pour 50% de gaz naturel importé sur le site. Les charges liées à la mise à disposition de ces combustibles ont été prises en compte sur la base d'un inventaire de pétrole brut entrant pour la première source d'énergie et de l'inventaire classique de gaz naturel pour la seconde. Pour tenir compte des émissions d'autres polluants, les données fournies par le registre national des polluants ont servi à construire un inventaire « émission de la raffinerie ». La somme de l'ensemble des émissions des raffineries françaises a été effectuée. Ces flux ont été alloués au diesel et à l'essence sur la base de leur allocation retenue en matière de CO₂, comme discuté dans le présent rapport. Ainsi, s'il est alloué à la fabrication d'un MJ de gazole x % du total des émissions de la raffinerie, il lui est aussi alloué x % des émissions des autres polluants. La justification de cette approche repose sur le fait qu'une grande partie des polluants est issue de combustion et donc liée aux émissions de CO₂. Aussi, les émissions de CO₂ illustrent l'énergie dépensée et donc la complexité à obtenir à un produit. Même si cette allocation sur la base du CO₂ émis et donc de l'énergie dépensée ne semble pas directement pertinente pour certains polluants, le fait de garder une règle d'allocation unique a été privilégié par souci de simplicité.

Tableau 28 – inventaire d'émission du raffinage d'un kg de gazole et d'essence

Emissions raffinerie	Gasoil	Essence	Emissions raffinerie	Gasoil	Essence
	kg/kg gasoil	kg/kg essence		kg/kg gasoil	kg/kg essence
Dioxyde de carbone, fossile	3,71E-01	2,80E-01	Mercure	5,36E-09	4,05E-09
Monoxyde carbone, fossile	6,37E-04	4,81E-04	Arsenic	4,28E-09	3,23E-09
Oxydes d'azote	4,98E-04	3,77E-04	Cadmium	3,96E-09	2,99E-09
COVNM, origine non spécifiée	3,71E-04	2,81E-04	Antimoine	2,58E-09	1,95E-09
Particules, > 2,5 µm, et < 10µm	7,07E-05	5,34E-05	Plomb	5,29E-10	4,00E-10
Méthane, fossile	1,34E-05	1,01E-05	Eau		
Protoxyde d'azote	1,25E-05	9,43E-06	DCO, Demande Chimique en Oxygène	8,62E-05	6,51E-05
Benzène	5,51E-06	4,16E-06	COT, Carbone Organique Total	2,77E-05	2,09E-05
Butadiène	8,97E-07	6,78E-07	Hydrocarbures, non spécifié	2,72E-06	2,06E-06
Nickel	6,52E-07	4,93E-07	Nickel, ion	6,52E-07	4,93E-07
Zinc	6,38E-08	4,83E-08	Phénol	8,05E-08	6,08E-08

Emissions raffinerie	Gasoil	Essence	Emissions raffinerie	Gasoil	Essence
Air	kg/kg gasoil	kg/kg essence		kg/kg gasoil	kg/kg essence
HAP, hydrocarbures aromatiques polycycliques	1,56E-08	1,18E-08	Chrome, ion	1,21E-08	9,13E-09
Cobalt	5,66E-09	4,28E-09	Plomb	5,29E-10	4,00E-10

Source : iREP : Registre des Emissions de Polluants

Ces inventaires sont bien entendus perfectibles. La règle d'allocation est un choix réalisé dans ce contexte précis. Il faut noter que le registre des polluants n'est pas homogène quant aux émissions relevées, certaines grandes raffineries n'ayant pas mention d'émissions de monoxyde de carbone par exemple. Les valeurs proposées ici moyennent ces possibles manques et sont donc probablement plus faibles que la réalité. Une analyse de sensibilité sera conduite sur cet inventaire, avec une simulation d'augmentation de 30% des composés suivants (méthane, CO, poussières, Zn pour l'air, Azote total, DBO, DCO, hydrocarbures pour l'eau), pour lesquels les données semblent à améliorer.

4.3.4. SCENARII PROSPECTIFS A 5 ANS

Des échanges avec l'IFP laissent penser que sur un horizon de 5 ans, le raffinage ne devrait pas connaître de changements majeurs dans ses équilibres en terme de types de bruts traités ou de procédés. Le passage à EURO5 n'a pas été estimé suffisamment impactant sur les spécifications des carburants pour être modélisé. Il a ainsi été décidé de ne pas changer les consommations et les émissions de l'étape raffinerie pour les produits des raffineries (gazole, essence, isobutène).

Notons cependant que **l'incorporation croissante de biocarburant est un événement pouvant potentiellement modifier les équilibres des raffineries** et donc leur niveau global d'émissions. Savoir quantifier et attribuer ces effets à une cause donnée (augmentation de l'incorporation des biocarburants) est un sujet complexe. Ces points n'ont pu être pleinement intégrés dans cette étude mais sont évoqués comme une perspective d'approfondissement dans le § 8.8.

4.4. ETAPES ETBE

L'ETBE est un composé obtenu à partir d'éthanol et d'isobutène, molécule insaturée des coupes C4. Les propriétés de volatilité et en carburation en font un carburant souvent plus facile d'utilisation que l'éthanol incorporé directement.

Suite au travail sur la représentativité des procédés, deux voies ont dû être ici modélisées. Celle appelée « voie raffinerie » (cf fig 7) est mise en œuvre par TOTAL sur trois sites et concerne un quart du potentiel de production national. Elle consiste à valoriser sur place l'isobutène produit par la raffinerie en sortie du craqueur catalytique FCC. La seconde passe par des sites de l'industrie chimique et consiste en général à valoriser le coproduit de la réaction de synthèse de l'oxyde de propylène, l'alcool tertiobutyle TBA, en le transformant en isobutène qui ensuite permet la synthèse d'ETBE (cf fig 6). Les quantités en jeu sont ici plus importantes puisqu'un site en France représente à lui seul, un potentiel de production équivalent au deux tiers du potentiel français en place. Ce site récent et performant est mis en œuvre par Lyondell Basell à Fos sur Mer. Un schéma des deux voies et des frontières du système est présenté ci-dessous.

Figure 5 – Schéma du système considéré pour l'ETBE voie chimique

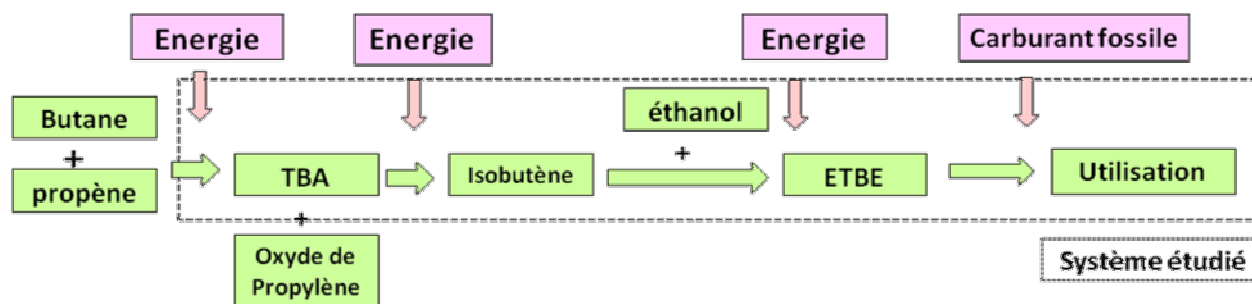
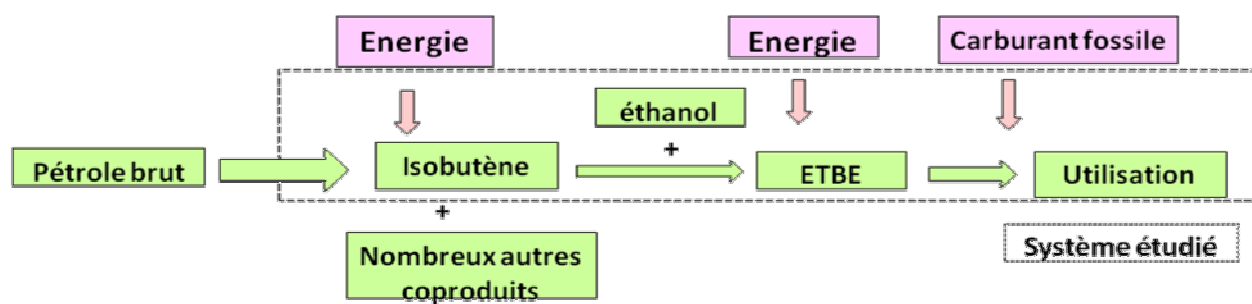


Figure 6 - Schéma du système considéré pour l'ETBE voie raffinerie



4.4.1. LIMITATION LIEE AUX FRONTIERES DU SYSTEME

De manière générale, en cohérence avec le référentiel 2008, l'étude actuelle n'a pas pris en compte l'impact potentiel de l'incorporation d'oxygénés sur les spécifications des carburants fossiles du mélange. Elle n'intègre donc pas les potentielles évolutions de consommation et d'émissions de leur raffinage, étape non intégrée au système en tant que telle. Cette limitation peut devenir non négligeable pour l'ETBE pour lequel des éléments techniques et des premiers résultats de simulations tendraient à montrer un effet bénéfique de cette molécule sur la marche de la raffinerie. Ces éléments appellent à être vérifiés dans des situations plus variées et à faire l'objet de travaux méthodologiques complémentaires sur la répartition entre produits des écarts mesurés. Pour cette raison, ils n'ont pas été intégrés à cette présente étude. Toutefois, afin d'illustrer dès à présent l'effet que pourrait avoir leur prise en compte sur le résultat global de la voie ETBE notamment, quelques éléments supplémentaires sont donnés dans le § 8.8 à titre d'information.

4.4.2. SOURCE DE DONNEES

Les deux industriels faisant fonctionner les sites de production français ont accepté de fournir pour cette étude leurs données confidentielles de consommations énergétiques et d'émissions.

4.4.3. QUANTIFICATION DE LA CHARGE AMONT DE L'ISOBUTENE

Le travail de modélisation de l'amont du système jusqu'à la fabrication de l'isobutène est appelé « charge amont de l'isobutène ». Ces étapes sont les plus délicates de cette modélisation car tout comme la quantification des émissions allouées au gazole et à l'essence, la multiplicité des produits et des réactions complique toute attribution directe. Ces charges amont doivent intégrer la

consommation de réactifs et des énergies nécessaires à la fabrication des produits. Un souci de cohérence et de simplicité a animé les choix de modélisation pour ce produit. Le tableau ci-dessous résume les méthodes retenues.

Tableau 29 – calcul des charges amont de l’isobutène

	Réactifs	Allocation des réactifs	Autres intrants de fabrication	Allocation des autres intrants
ETBE voie raffinerie	Pétrole brut	Allocation énergétique (dont le résultat conduit à considérer qu’1MJ de pétrole brut permet de produire 1 MJ d’isobutène)	Energie vapeur et électrique	calcul étape par étape, allocation massique entre coproduits
ETBE voie chimique	Butane de champ gazier, et propène	Allocation énergétique entre TBA et Oxyde de Propylène (dont le résultat conduit à considérer qu’1,1 MJ d’intrants produit 1 MJ de TBA)	Energie vapeur et électrique	calcul étape par étape, allocation massique entre coproduits

Un MJ de butane est modélisé par un MJ de gaz naturel, auquel a été ajoutée l’énergie nécessaire à l’étape de fractionnement. Le propène a été considéré comme majoritairement issu du craqueur catalytique de raffinerie (FCC), et donc modélisé sur la base de l’isobutène produit par le FCC. Ce dernier a vu sa charge amont estimée de la même manière que pour un gazole ou une essence. Un MJ d’isobutène raffinerie est constitué d’un MJ de pétrole brut auquel s’ajoutent des consommations et des émissions de production liées au raffinage (données communiquées par TOTAL). Ces données ont été mises à jour depuis l’étude ADEME-DIREM de 2002 et sont estimées à 4,3 GJf/t isobutène et 0,46 t eqCO₂/t isobutène. Pour ce qui concerne la voie chimique, l’allocation énergétique (masse coproduits x PCI des coproduits) a été aussi conduite afin de savoir quelle part des réactifs amonts été à attribuée au TBA par rapport à l’oxyde de propylène. Il est à noter que les réactifs sont intégrés avec leurs charges de transport respectives (inventaire ECOINVENT pour le pétrole brut transporté en Europe, idem pour le butane et propène).

4.4.4. ETAPE DE FABRICATION DE L’ETBE

A la charge amont de l’isobutène ont été ajoutées :

- ▶ Les émissions liées à la fabrication et au transport de l’éthanol sur le site de production, selon le produit agricole analysé. Le transport est supposé être le transport moyen standard pour l’éthanol pour la voie raffinerie, alors que la voie chimique ne bénéficie que d’apports d’éthanol par rail ou par voie maritime.
- ▶ L’énergie nécessaire pour réaliser cette réaction (chaleur + électricité)

Les catalyseurs utilisés le cas échéant sont des catalyseurs solides ne nécessitant pas d’étape spécifique. Ils ont été négligés à la vue des éléments de remplacement fournis par les industriels.

L’inventaire des émissions d’autres polluants pour la production d’ETBE par la voie raffinerie a été calculé de manière identique à celui du gazole et de l’essence, à partir des émissions de CO₂ attribuées à la fabrication de l’isobutène. Avec une charge d’émission de CO₂ allouée équivalente à celle du gazole et de l’essence, l’inventaire est très proche de ces derniers et n’a donc pas été reproduit directement. La même approche a été conduite à partir des données du registre des

polluants pour le site de Fos-Sur-Mer pour la voie chimique. Les émissions retenues figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 30 – inventaire des émissions allouées à la production d'un kg d'ETBE

émissions voie Chimique, ETBE	kg / kg ETBE
COVNM	4,6 E-05
Zinc, ion	9,1 E-08

Source: Registre National des Emissions de Polluants iREP

4.5. ETAPES VEHICULE

Afin de prolonger l'ACV des biocarburants du réservoir à la roue, le référentiel 2008 doit être complété pour prendre en compte cette étape supplémentaire de l'ACV. Ayant intégré les dimensions toxicité et oxydation photochimique dans ce travail, cette étape ne peut être modélisée sans un niveau de précision suffisant. Cela passe par l'utilisation de mesures réelles d'émissions en sortie d'échappement et par la bonne compréhension des variables influant ces émissions. Les éléments suivant donnent un aperçu des enjeux méthodologiques qui se posent ainsi :

- ▶ Quels impacts de la modélisation du véhicule, de sa motorisation, de ses performances, sur les résultats absolus et relatifs (un ou plusieurs véhicules de référence ? moyenne des véhicules en circulation ?)
- ▶ Quels impacts du choix du cycle de référence sur les résultats absolus et relatifs (cycle normalisé ou réel) ?
- ▶ Quelle modélisation et quels impacts des adaptations éventuelles des véhicules aux biocarburants ?

Avant d'aborder ces problématiques, le paragraphe suivant décrit les carburants modélisés.

4.5.1. CARBURANTS MODELISES

En intégrant la phase véhicule, cette étude a nécessité d'intégrer des éléments sur les carburants réellement utilisés. Les carburants suivants ont été modélisés pour ce travail.

- ▶ E0 : essence standard, sans éthanol incorporé. Les spécifications sont celles utilisées dans le rapport de l'IFP ayant servi de référence (voir le paragraphe *essence* ci-dessous).
- ▶ E10 : mélange de 10% d'éthanol en volume
- ▶ E85 : mélange de 85% d'éthanol en volume

- ▶ B0 : gazole standard, sans ester incorporé. Les spécifications sont celles utilisées dans le rapport de l'IFP ayant servi de référence (voir le paragraphe *diesel* ci-dessous).
- ▶ B10 : mélange de 10% d'ester en volume
- ▶ B30 : mélange de 30% d'ester en volume
- ▶ HVP : huile végétale pure, introduite pure directement comme carburant.

Le tableau 31 détaille la part PCI du biocarburant dans le mélange. On peut noter que la part PCI de l'ETBE ici considérée est inférieure à la limite autorisée de 22%⁷. Cela n'impacte pas les résultats donnés par MJ de biocarburant. Les données énergétiques des carburants utilisées pour conduire ces calculs sont présentées en annexe au présent rapport et sont issues des données de l'étude JEC.

Tableau 31 – Part PCI des carburants modélisés

Parts incorporation à Utiliser	E0	E10	E85	
part PCI éthanol dans le carburant final	0%	6,8%	78,9%	
part PCI ETBE dans carburant	0%	19,8%		
	B0	B10	B30	HVP
part PCI Esters dans le carburant final	0%	9,3%	28,4%	100%

4.5.2. IMPACT DU CHOIX DE VEHICULE ET DE SA MOTORISATION

Les émissions entre véhicules varient sensiblement en fonction de paramètres liés à la motorisation, à ses réglages et à son usure. A technologie identique, la variabilité entre véhicules est cependant moindre. Deux technologies sont devenues majoritaires dans le parc français ces dernières années :

- l'injection directe pour les moteurs gazole, qui représente 100% du marché français (ventes annuelles) depuis quelques années,
- et l'injection multipoint indirecte pour les véhicules à essence, qui représente environ 90% du marché (ventes annuelles).

Il est proposé de choisir un véhicule courant par sa taille et son type de motorisation dans le parc circulant de véhicule, avec des performances minimales adaptées au marché sur les prochaines années. Surtout, les mesures doivent être faites sur le même véhicule dans les mêmes conditions entre carburants comparés et avec un type d'injection / motorisation qui permette les adaptations techniques nécessaires à mettre en œuvre le carburant à comparer.

⁷ cf arrêté ministériel du 26 janvier 2009 relatif aux caractéristiques du supercarburant sans plomb SP95-E10

Même avec un jeu de données répondant aux critères précédents, il est nécessaire d'être vigilant sur la représentativité des mesures choisies pour modéliser l'ensemble des filières. Les données utilisées ici ont été transmises par l'IFP. Elles sont issues principalement de deux études spécifiques réalisées par l'IFP et ont fait l'objet d'un échange afin de valider les tendances qu'elles dessinent sur une échelle plus large que les seuls véhicules étudiés. Ce sont ces données corrigées qui ont été introduites dans l'outil de calcul et qui figurent dans les tableaux ci-dessous. Les motorisations des véhicules ont été choisies parmi les technologies dominantes.

Mais il est important d'en souligner les limites. En effet, les données d'émission des véhicules, voire potentiellement les tendances, sont spécifiques à chaque application (moteur+ véhicule). Les niveaux d'émissions réels des véhicules sont liés à des stratégies d'optimisation du constructeur pour passer les normes au mieux et optimiser leur véhicule. Ainsi, pour un véhicule satisfaisant avec suffisamment de marge aux exigences de la norme en émission de CO, l'incorporation d'éthanol, abaissant encore ce niveau, peut permettre de modifier les réglages moteurs pour en optimiser d'autres paramètres. Aussi, ces émissions dépendent de l'âge du véhicule. Il est donc difficile de faire la part des choses entre tendances théoriques liées au carburant et niveaux réels d'émission liés à des stratégies d'optimisation des moteurs. Les tendances d'évolution ici proposées essaient de proposer un intermédiaire entre ces deux évolutions.

Des écarts entre carburants issus de l'étape véhicule doivent donc être appréhendés comme des indications à confirmer par de plus amples mesures.

4.5.2.1 Diesel et esters méthyliques :

L'étude de référence suivante a été utilisée : *incorporation d'ester éthylique d'huile végétale dans les gazoles, l. forti, a. di pancrazio, f. kerdelhue et b. flaconneche – IFP, mars 2008 [EEHV,IFP, 2008]*. Le véhicule utilisé pour réaliser les mesures sur banc à rouleau est une *Renault Clio III dCi*, 1.46 litres, véhicule répondant aux normes EURO 4, avec injection directe common rail et catalyseur d'oxydation, sans FAP. Les émissions de référence pour le gasoil sont celles issues des tests sur ce véhicule pour un Gazole Hiver : gazole EN 590 sans soufre de type hiver (noté GOH).

Les évolutions par rapport au carburant de référence sont les suivantes :

Tableau 32 – Emissions véhicule, Gazole et mélanges

	GOH	B10	B30	Commentaire, source
Consommation	1,70 MJ/km	1,70 MJ/km	1,70 MJ/km	Etude [EEHV,IFP, 2008].
CO ₂	125 g/km	Idem GOH Avec une partie en CO ₂ biogénique (à hauteur du contenu en carbone biogénique du mélange)	Idem GOH Part CO ₂ biogénique rajoutée	Etude [EEHV,IFP, 2008] + dire d'expert Les effets sont très faibles (2-3%), parfois positifs, parfois négatif. Choix de considérer comme stable

	GOH	B10	B30	Commentaire, source
CO	20 mg/km	Idem GOH	Idem GOH	Etude [EEHV,IFP, 2008] + dire d'expert Les niveaux d'émission sur EURO4 sont très faibles, l'écart mesuré dans le rapport IFP estimé non réellement significatif
NOx	250 mg/km	Augmentation 3%	Augmentation 3%	Etude [EEHV,IFP, 2008]+ dire d'expert Une augmentation de 0 à 5% peut exister.
COV NM	9 mg/km	Baisse globale de 5%	Baisse globale de 5%	Etude [EEHV,IFP, 2008]+ dire d'expert
Dont HAP	1,2 mg/km	Baisse de 25%	Baisse de 25%	Etude [EEHV,IFP, 2008]+ dire d'expert Un des effets des esters méthyliques est une réduction des HAP. L'ordre de grandeur est issu des tests IFP.
Particules	22,5 mg/km	Baisse de 10%	Baisse de 20%	Etude [EEHV,IFP, 2008]+ dire d'expert Le véhicule pris comme base n'est pas équipé de filtre à particule. Avec un filtre à particule, le niveau initial du GOH serait très faible et l'écart non perceptible.

La consommation est quand à elle relativement stable : le travail généré par un MJ d'ester peut-être considéré identique au travail généré par 1 MJ de gasoil fossile. La part de CO₂ biogénique est calculée au prorata de l'énergie d'origine renouvelable contenue dans le carburant.

Enfin, il a été fait l'hypothèse que les différents types d'esters, qu'ils soient d'origine végétale ou animale, présentaient des rendements et des niveaux d'émissions identiques. Les quelques tests réalisés montrent un écart très léger entre ces produits, mais de second ordre par rapport aux évolutions générales.

4.5.2.2 Essence et éthanol :

L'étude de référence suivante a servi de référence pour le véhicule essence : *FFV et superéthanol : bilan et analyse du démarrage à froid, des émissions à l'échappement, et par évaporation. Sabine GUICHAOUA et Bertrand LECOINTE, IFP, décembre 2008 [éthanol, IFP, 2008]*

Le véhicule utilisé pour réaliser les mesures sur banc à rouleau est une C4 BioFlex 1.6l de série, répondant aux normes EURO4 (moteur essence TU5JP4 FlexFuel, boîte manuelle 5 rapports). L'essence de référence utilisée est une essence standard SP95 EN228 ayant une pression de vapeur saturante de 60 kPa. Un carburant E10 n'entraîne pas de modification de la température d'échappement ou de problème de démarrage à froid. Les effets de réglage du véhicule ou de la technologie sont donc faibles sur les résultats.. Soulignons que la teneur en HAP peut varier fortement d'un véhicule à un autre, ce qui joue un rôle important dans l'analyse du potentiel de toxicité humaine, comme on le verra plus tard.

Tableau 33 – Emissions véhicule, essence et mélanges

	SP95	E10	E85	Commentaire, source
Consommation	2,20 MJ/km	2,20 MJ/km	2,20 MJ/km	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert Notons que la légère réduction de consommation (notamment E85) liée à l'incorporation de l'éthanol n'est pas prise en compte
CO ₂	164 g/km	Baisse de 1g/km, Avec une partie en CO ₂ biogénique (à hauteur du contenu en carbone biogénique du mélange)	Baisse de 10 g/km, Intégration d'une part de CO ₂ biogénique	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert
CO	456 mg/km	Réduction de 25%	Réduction de 20%	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert
NOx	11 mg/km	stabilité	stabilité	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert
Particules	Non prises en compte	Non prises en compte	Non prises en compte	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert
COV NM	34 mg/km	Baisse de 10% en global, et modification de la composition	Augmentation pour atteindre 59 mg/km	
<i>Dont HAP</i>	0,05 mg/km,	Stabilité	Stabilité	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert Les niveaux sont très faibles, inférieurs au seuil de détection de 0,1 mg/km
<i>Dont Toluène</i>	4 mg/km	Stabilité	Baisse (à 1,5 mg/km)	[éthanol, IFP, 2008]+ dire d'expert Grande variabilité de cette émission entre véhicule
<i>Dont COV particuliers</i>	0 mg/km d'éthanol, 1 mg/km acétaldéhyde	3 mg/km d'éthanol, 1 mg/km acétaldéhyde	35 mg/km d'éthanol 5 mg/km acétaldéhyde	
Méthane	3 mg/km	Stable	En augmentation (à 6mg/km)	

Tableau 34 – Détail de la modélisation des émissions CO₂ des E10 et E85

Ethanol : Prise en compte d'un effet sur les émissions CO₂

L'éthanol contient légèrement moins de carbone par MJ de carburant qu'un carburant fossile (rapport H/C différent). Il est donc moins émetteur de CO₂ par MJ consommé de carburant. Dans un mélange en E10, des calculs théoriques sur le niveau d'émission attendu de CO₂ arriveraient à des réductions de l'ordre de 0,4 à 0,5 g CO₂/km parcouru. Cette baisse est en deçà de la précision de la mesure du CO₂ estimée être à 1 gCO₂ /km.

Les mesures sur véhicules et carburants réels laissent penser que les niveaux d'émission de CO₂ pour des E10 baisseraient entre 1 et 3 g CO₂/km. Cette baisse est en partie due à la reformulation nécessaire des essences pour respecter les spécifications des carburants E10 ou E85. Cette

reformulation lors du raffinage des essences conduit à réduire les aromatiques pour produire des bases essences adaptées au mélange (appelées RBOB pour *Reformulated Gasoline Blendstock for Oxygen Blending* (base essence reformulée pour mélange avec des oxygénés)).

Même si l'on enlève cet effet de changement de composition du carburant, en prenant des mesures sur des carburants mélangeant directement, sans reformulation préalable, une essence SP95 avec de l'éthanol (appelé aussi « splash blending »), les mesures dont on dispose induisent des réductions d'émissions allant de 0 à 2 gCO₂/km, avec une moyenne de 0,9% (soit environ 1,4 gCO₂/km parcouru pour un niveau d'émission de 164 g CO₂/km). Ces mesures, bien que peu nombreuses, commencent à faire sens et justifient de ne pas reporter dans la zone d'imprécision de la mesure ce résultat. Cette réduction moyenne des émissions CO₂ s'expliquerait par un très léger effet d'amélioration du rendement moteur (+0,5 à +1%) pour un E10, effet confirmé sur les E85 qui présentent en conduite chargée des effets avérés (de quelques pourcents) de réduction de consommation. Cet impact ne peut être attribué qu'à une évolution de la composition chimique du carburant (rapport H/C) ou éventuellement à sa chaleur latente de vaporisation (moteurs à injection directe d'essence), et donc à l'éthanol.

Un débat a eu lieu au sein du groupe de travail pour savoir à qui attribuer les effets de la reformulation des essences sur l'environnement (aux raffineries qui le mettent en œuvre ou aux filières biocarburants qui l'ont suscité ?). La présente étude attribue les écarts d'émission entre les carburants fossiles de référence et les biocarburants à la part biocarburant du mélange, ce qui plaiderait plutôt pour une affectation aux biocarburants des changements sur la base carburant. Inversement et étant donné que cela reviendrait à modéliser les écarts de fonctionnement des raffineries, il faudrait envisager de rentrer sur ce point dans une logique de comparaison de scénarii, donc de type ACV conséquentielle. Cela a été plutôt évité dans cette étude sauf élément avéré et majeur, comme le cas du Changement d'Affectation des Sols. De plus, n'arrivant pas à finaliser dans le pas de temps de cette étude les travaux commencés sur les effets de ces changements sur le raffinage (voir partie 8.8 sur ces effets d'incorporation), il est apparu complexe de prétendre modéliser les évolutions sur toute la chaîne d'une reformulation des essences.

Compte-tenu de ces éléments, une modélisation prudente est utilisée dans la présente étude :

- Compte tenu de débat sur l'attribution de cet effet CO₂ et des difficultés à modéliser les effets sur la raffinerie d'un changement de base essence (voir partie 8.8 sur les effets d'incorporation), il est convenu d'éviter de mélanger les sources d'évolution. Le niveau de cette baisse sera mesuré à partir d'études réalisées sur des mélanges en « splash blending », i.e. en incorporant directement l'éthanol à une essence classique non spécifiquement adaptée pour ce mélange. Même si cela ne représente pas la réalité des carburants utilisés (la majorité de l'éthanol est incorporé à des bases essence adaptées RBOB), cela permettra de quantifier la part propre à l'éthanol de cet effet.
- Prise en compte de cet effet amélioration du remplissage moteur via une baisse prudente des émissions CO₂ de 1 g CO₂/km entre E0 et E10, soit légèrement supérieure à celle attendue par un calcul sur la composition en carbone. Etant donné le faible écart que cela signifie sur le rendement moteur, il est considéré que le rendement moteur (MJ/km) est stable pour un E10, mais aussi sur un E85 (ce qui est déjà une approximation plus forte).
- Il est important de souligner que ces effets sont à la limite de la mesurabilité des niveaux d'émission CO₂. D'autres mesures plus nombreuses pourront venir conforter (ou non) cet effet.

Ainsi, compte tenu de la proximité de l'effet avec la précision de la mesure sur véhicule, ainsi que de la démultiplication de ce petit effet via l'effet de levier d'un mélange comme l'E10 (ramener un petit

effet sur un volume faible de carburant augmente en valeur cet effet), il conviendra d'être prudent quant à la prise en compte de ces valeurs et de chercher à affiner les mesures sur véhicule pour confirmer ces éléments.

Compte tenu d'un comportement proche lors de la phase de combustion entre l'éthanol et l'ETBE, et leurs mélanges, les données disponibles sur la combustion d'un mélange éthanol – essence ont aussi été utilisées pour les éthers.

4.5.2.3 Huile végétale Pure :

L'huile végétale pure est un carburant plus difficile à mettre en œuvre que l'éthanol ou les esters méthyliques. Sa viscosité, son poids rendent sa carburation de moins en moins adaptée dans les moteurs récents qui exigent des carburants légers, peu visqueux et purs. A côté d'émissions qui se dégradent, il pose des questions de fiabilité des moteurs difficiles à résoudre. Pour ces raisons, il n'est actuellement que très ponctuellement autorisé (tracteurs principalement et expérimentations dans des flottes captives de collectivités locales). Son impact sur les émissions est très lié à ses caractéristiques qui dégradent globalement la combustion dans les moteurs récents. Ces effets sont partiellement compensés moyennant des adaptations globales, avec par exemple des kits d'adaptation permettant la préchauffe de l'huile et/ou l'utilisation en pleine charge de l'huile grâce à un système de switch de carburant, phase où l'huile devient moins pénalisante pour le moteur. Plus que ses niveaux d'émission, l'enjeu réel et actuel de ce carburant réside dans sa compatibilité avec les moteurs actuels et à venir. Les difficultés qu'il pose le rendent très impopulaire auprès des constructeurs.

Pour ces raisons, peu d'études existent sur le niveau d'émission de tracteurs fonctionnant avec des huiles, voire des véhicules légers. Les études existantes montrent une variabilité importante des émissions en fonction des technologies des moteurs. Certains effets, sur les NOx ou les particules, varient entre les études. Les valeurs retenues cherchent à traduire les grandes tendances d'émission de ce carburant, et sont ainsi construites en laissant une place importante au dire d'expert par rapport aux différents essais moteurs rassemblés. Elles modélisent un moteur standard qui n'aurait subi aucun changement, ainsi qu'un moteur ayant reçu un kit d'adaptation. La valeur de référence B0 pour le diesel précédemment décrite a été conservée, les émissions étant exprimées en évolution par rapport à cette référence. **Les calculs sont réalisés par la suite uniquement pour un véhicule muni d'un kit d'adaptation**, le premier cas n'étant commercialement pas envisageable et entraînant des dépassements de normes d'émission.

Tableau 35 – Emissions véhicule, HVP 100%

	HVP 100%, moteur standard	HVP 100%, avec kit d'adaptation (filière retenue pour l'étude)	Commentaires
Consommation	+15%	+5%	L'huile, moins adaptée, détériore les performances du moteur
CO ₂	+ 15%	+ 5%	Lié à la baisse de la consommation
CO	+ 50%	+ 5%	Effet variable pour véhicule avec kit
NOx	+5%	+5%	Effets relativement faibles

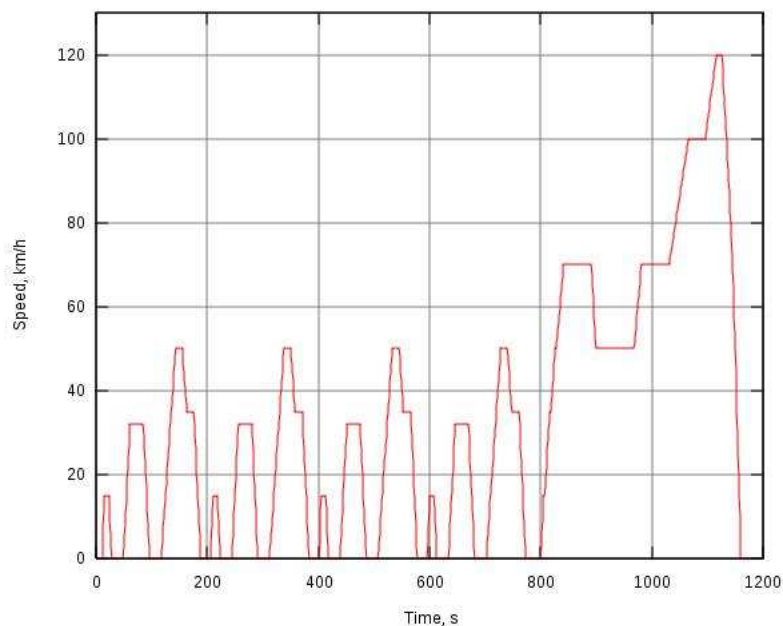
	HVP 100%, moteur standard	HVP 100%, avec kit d'adaptation (filière retenue pour l'étude)	Commentaires
Particules	+ 40 %	-10%	
COV NM	+ 100%	+40%	Des effets très forts

4.5.3. IMPACT DU CHOIX DU CYCLE DE MESURE D'EMISSION

Un cycle est un enchaînement déterminé et quantifié de différentes phases moteur censées représenter un véhicule dans son fonctionnement moyen. Un cycle de référence permet ainsi de normaliser les consommations et les émissions des véhicules, à partir de modèles prédéfinis de sollicitation du moteur, simulés sur véhicule réel au banc d'essai avec mesure des informations suivies. L'enjeu de la création de cycles est de chercher à représenter la réalité des conduites.

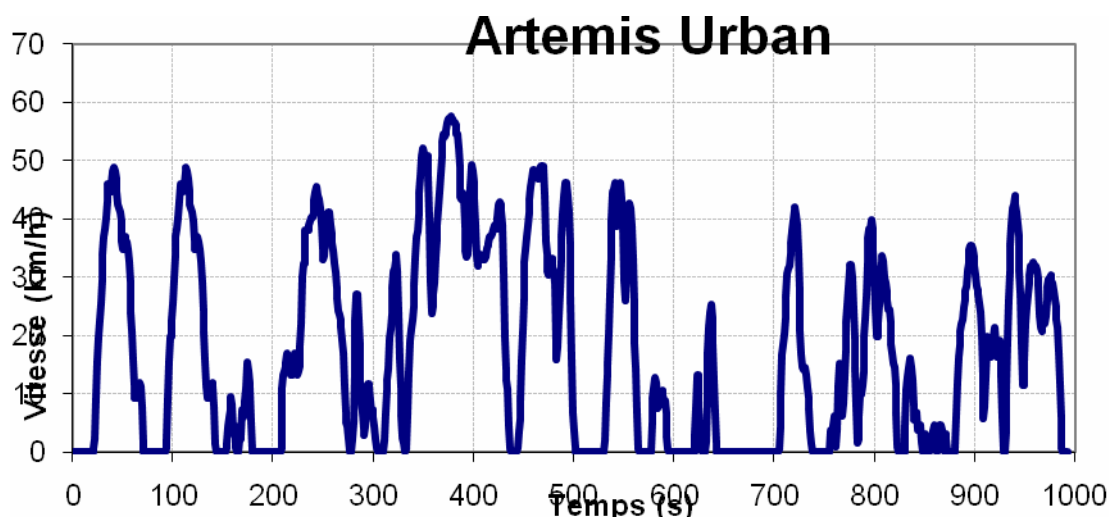
Le cycle le plus utilisé est le cycle normalisé européen de combustion (NEDC). Il représente le fonctionnement moyen des véhicules particuliers européens. Il est composé de 4 cycles courts (urbains) d'environ 12 minutes et de 8 minutes en extra urbain. Il est basé sur des données de circulation modélisant des circulations dans de grands centres urbains européens (typiquement, Paris et Rome) et présente une structure en modèles polygonaux.

Figure 7 - cycle normalisé européen de combustion



D'autres cycles existent pour véhicule léger dans différents environnements (l'INRETS et les cycles dits "ARTEMIS" par exemple). Les cycles ARTEMIS ont été développés dans le cadre du projet de recherche européen ARTEMIS, cherchant à dériver un jeu de cycle de conduite de référence. L'exemple du cycle urbain est donné ci-dessous. Ces cycles ne sont plus polygonaux et présentent des accélérations plus fortes, plus nombreuses, des arrêts plus fréquents.

Figure 8 – Cycle Artemis urbain



Les niveaux d'émission peuvent varier fortement selon les cycles considérés. L'étude [TZIRAKIS, 2006] met en évidence cette sensibilité en montrant que la consommation de carburant ainsi que les émissions de CO₂ augmentent de 60% lors de tests réalisés sur cycle urbain réel par rapport au cycle normalisé européen. Une augmentation du même ordre existe pour le monoxyde de carbone, alors qu'elle dépasse les 100% pour les NOx. Les émissions d'hydrocarbures semblent moins sensibles, avec assez peu de variations. Il faut aussi rappeler que le même véhicule, sur le même parcours, réalisé dans le même temps par deux conducteurs différents, ne donnera pas non plus le même niveau d'émissions, d'où les recommandations d'écoconduite par exemple afin de réduire les émissions.

Ainsi, une information peut sembler manquer encore aujourd'hui : comment les différents carburants se comportent-ils face à ces changements de cycles ? En d'autres termes, dans quelle mesure les écarts d'émission et de consommation, simulés sur un cycle, sont représentatifs de la réalité ? Il faudrait pour s'assurer de cela connaître plus précisément les comportements respectifs des carburants lors des phases d'accélération ou lors de croisières à bas et haut régimes, afin de déterminer si le choix d'un cycle plus ou moins urbain, ou plus ou moins modélisé, joue dans un sens ou dans l'autre. L'hypothèse implicitement faite par l'ensemble des études consiste à considérer ces différences comme peu significatives, et donc négligeables par rapport aux écarts entre carburants sur un cycle donné.

N'ayant pas d'éléments chiffrés aussi fins, nous proposons de retenir pour le moment lors d'ACV comparatives, l'hypothèse implicite précédemment évoquée, selon laquelle, entre carburants, le fait d'utiliser un même cycle de référence suffit à obtenir une idée fiable des différences relatives de comportement à la combustion entre ces carburants, et qu'aucun des carburants n'est plus avantageux qu'un autre si le cycle est bien conforme aux phases de conduite moyennes. Avec une place centrale en termes d'homologation et de données disponibles, et surtout l'ambition de représenter l'utilisation moyenne des véhicules européens, le cycle NEDC a été privilégié. Des échanges avec l'IFP ont aussi été utilisés afin de faire ressortir les grandes tendances des carburants et moyenner ainsi les phénomènes épisodiques.

4.5.4. MODIFICATIONS NECESSAIRES DU VEHICULE

Il convient aussi de se poser la question des modifications que peut nécessiter au niveau du moteur, de l'échappement, du réservoir, l'utilisation de carburants partiellement ou totalement à base de biocarburant. Derrières ces modifications, nous cherchons à connaître ici le besoin et le niveau de modélisation qu'elles nécessiteraient dans le cadre de cette ACV.

On peut regrouper ces changements en cinq grandes catégories, dont les deux principales sont les deux premières citées :

- Adaptation des réglages moteurs : au niveau de l'injection, nouvelle calibration et nouveaux réglages sonde, bougies (E85). En effet, le fait de devoir adapter des véhicules à une variabilité plus grande des carburants, voire à être réellement flexible entre filières très différentes, pourrait conduire à dégrader les performances de combustion par rapport à une situation où la combustion serait optimisée pour un carburant.
- Adaptation des pièces à la conception : Impact sur le dessin et les matériaux injecteurs (débit) (E85), pistons et segments renforcés, compatibilité des matériaux utilisés (réservoir, filtres, circuits carburants, échappement)
- Rajout éventuel d'éléments : Système d'aide au démarrage à froid (Scandinavie) - Adaptation des pratiques : énergie dans le réservoir moindre, donc besoins plus fréquents de faire le plein.

Les éléments rapportés montrent que le coût d'adaptation des véhicules, même pour des véhicules flex-fuel, reste modéré par rapport au coût global du véhicule. Le coût étant une transcription des quantités de matière et d'énergie dépensées pour intégrer ces changements, il est un indicateur indirect et simple de quantification de ces changements.

Pour des niveaux d'incorporation restant modérés, les coûts environnementaux des impacts liés à la réalisation des modifications des techniques et pratiques peuvent être négligés par rapport aux impacts liés à l'usage du véhicule et, plus important, par rapport aux différences d'émissions entre carburants. Pour cette étude pour laquelle les amortissements des sites industriels n'ont pas été pris en compte, le choix a été fait de ne pas intégrer les amortissements du véhicule, très largement identiques entre carburants et donc non discriminants dans une approche comparative.

La question de la moindre optimisation éventuelle de la carburation en cas d'une augmentation de la variabilité des qualités de carburants mériterait d'être expertisée plus en profondeur, ce qui n'a pu être fait dans ce travail. Pour des carburants dérivant majoritairement de biocarburant, la question pourrait aussi se poser du coût de la création d'une filière à part entière (type E85).

Tableau 36 – Synthèse des choix réalisés

Enjeu de modélisation	Problématique	Choix réalisé
Niveau de précision attendu	Les carburants jouent un rôle important sur le cycle de vie au niveau des NOx et des particules. Cependant, les choix de modélisation des émissions au niveau des raffineries (allocation massique sur les produits) et les incertitudes de la phase agricole n'imposent pas un niveau de précision très élevé pour cette phase.	Niveau de détail cherchant les effets de premier ordre, par cohérence avec les incertitudes de l'amont.
Choix du cycle	S'assurer que le choix d'un cycle ne privilégie une filière plutôt qu'une autre	NEDC + validation avec experts des tendances mesurées

Choix du véhicule de référence	limiter les effets du choix du véhicule dans la comparaison entre filières	Un véhicule léger représentatif du marché actuel : un essence et un second en gasoil, EURO4 ; un en EURO5 pour les perspectives. Pas d'inventaire poids lourd. Mesures des émissions sur banc à rouleau + validation avec experts des tendances mesurées
Modifications nécessaires du véhicule	Y a-t-il un surcoût à utiliser des biocarburants dans la conception ou l'utilisation du véhicule ?	Négligées du fait du faible impact, de l'imprécision des autres étapes et du choix méthodologique de ne pas prendre en considération l'amortissement du matériel.

4.5.5. EMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE BIOGENIQUE

Pour les esters, étant donné qu'il n'est pas mesuré d'écart d'émission CO₂ lors de l'utilisation des carburants, il a été retenu l'hypothèse d'un niveau d'émission CO₂ par MJ de carburant identique entre l'ester et le diesel. La part de CO₂ biogénique est calculée sur cette base. Cela revient à considérer que l'ester n'influe pas sur le niveau d'émission globale du gasoil.

Pour les éthanol, compte tenu d'évolutions à la baisse des émissions CO₂ des E10 et E85 par rapport à l'E0 (voir l'encadré du paragraphe 4.5.2.2), il a été nécessaire de raffiner le raisonnement précédent en faisant intervenir le contenu carbone de chaque carburant. Ainsi, la fraction biogénique de dioxyde de carbone émise pour une essence en mélange a été considérée proportionnelle à son contenu carbone dans ledit carburant. Le tableau suivant détaille le calcul pour obtenir cette part de carbone biogénique et illustre que ce correctif donne un résultat très proche d'une répartition énergétique par MJ.

	PCI (MJ/kg)	Contenu Carbone (%m)	kg Carbone/ MJ	part en énergie dans l'E10	kg Carbone/ MJ E10	part contenu Carbone dans l'E10	part en énergie dans l'E85	part contenu Carbone dans l'E85
	A	B	C = B/A	D	E = D*C	% E dans le total	D'	% E'
essence	43,2	86,4%	0,02	93,16%	0,01863128	93,32%	21,07%	21,51%
éthanol	26,8	52,2%	0,01947	6,84%	0,00133297	6,68%	78,93%	78,49%

Ainsi, pour un niveau d'émission mesuré de 163 g CO₂/km sur le véhicule représentatif considéré ([éthanol, IFP, 2008]), ce sont 163 x 6,68% g CO₂ d'émissions estimées être d'origine biogénique.

Une telle approche conduit à considérer qu'il y a eu une réduction très légère sur le niveau d'émission CO₂ du MJ d'essence mélangée à l'éthanol, d'où l'apparition d'un léger gain d'émission à l'étape véhicule dans les résultats (voir chapitre 6).

4.6. FILIERE GRAISSES ANIMALES ET HUILES VEGETALES USAGEES

D'autres corps gras peuvent être utilisés pour la production d'ester méthylique. Les graisses d'origine animale et les huiles alimentaires usagées sont des gisements potentiels de production, permettant une valorisation intéressante de ces matières sous forme de carburant (EMGA pour les graisses animales, EMHAU pour les huiles alimentaires usagées). Ces deux nouvelles filières de valorisations,

qui n'existent pas encore en France, ont été ajoutées aux filières entrant dans le champ de cette étude. Même si le débat existe sur leur classement en biocarburant de première ou de seconde génération du fait d'une non-compétition avec l'alimentaire, la relative maturité des procédés et leur proximité avec ceux de la première génération facilite un rapprochement de forme et explique leur intégration dans cette étude.

Il a été nécessaire de compléter le référentiel méthodologique concernant spécifiquement ces filières. Notamment, la principale question se posant pour la réalisation d'une ACV sur ces dernières réside dans la manière de prendre en compte des matières entrantes. Faut-il considérer les graisses animales, issues des sous-produits animaux, et les huiles usagées, comme des coproduits portant une partie des charges de leur amont, ou alors comme de véritables déchets sans valeurs et non souhaités, et ne leur attribuer ainsi aucune charge environnementale ?

Une fois cette question tranchée, il reste à définir les frontières du système et à s'assurer de la représentativité des procédés modélisés.

4.6.1. QUELLE CHARGE AMONT POUR CES MATIERES ?

Différentes ACV se sont déjà penchées sur cette question et l'ont résolu de manières différentes, certaines n'allouant pas d'impact à la graisse ou à l'huile usagée collectées, d'autres leur faisant supporter une part des bilans amont (production de la viande, ou production de l'huile alimentaire). Aucun argument consensuel ne fait jour à travers ce regard bibliographique. Afin de savoir s'il convenait de leur attribuer une part des étapes de production de ces matières, plusieurs points ont été investigués :

- Quelle est l'utilisation actuelle de ces matières ?
- Est-on bien sûr des matières considérées comme des déchets ?
- Que font les ACV viandes ou huiles en la matière ? Il faudrait en effet éviter les incohérences entre une ACV d'utilisation aval de ces matières qui les considéreraient sans impact, et leur amont qui leur allouerait une part de ses impacts.

➤ Utilisation actuelle

Les huiles alimentaires usagées sont des composés relativement homogènes et présentant une acidité de 3 à 7%, plus élevée que les huiles végétales qui sont aux alentours de 1%. On peut aussi noter la présence de quelques impuretés. Les volumes mobilisables sont issus principalement de la « restaurations et industriels » et sont estimés à environ 70 000 tonnes/an en 2007-2008. De ces volumes, entre 30 000- 40 000 tonnes sont collectées par an. La valorisation actuelle de ces produits est la production de biocarburant (revendu en Allemagne notamment), depuis le milieu des années 90. Avant 2001, ces huiles pouvaient être intégrées dans l'alimentation animale (interdiction depuis). Etant déjà utilisées comme carburant, il n'y a donc pas de substitution directe à craindre vis-à-vis d'un autre marché, mais plus probablement des rééquilibrages au niveau des sites de productions de biocarburants entre sources d'approvisionnement en matière première entre pays.

Les graisses animales ont une acidité qui peut être parfois encore plus élevée pour atteindre 10 à 15% dans certains cas. Elles présentent aussi quelques spécificités dans leur origine qui justifient une grande vigilance dans leur préparation. En matière d'utilisation, le tableau suivant détaille leur devenir actuel. Suivant leur classification en matière de risque sanitaire, les débouchés sont différents du fait du règlement 1774/2002 sur les sous-produits animaux. Les produits les plus à risque (Catégorie C1 et C2) sont incinérés. Les produits C3 connaissent diverses valorisations.

Toutes les graisses animales sont susceptibles d'être utilisées en biocarburant. Mais ce sont principalement et par ordre, les graisses de catégorie 3 multi-espèces contenant du ruminant et les graisses animales C1/C2 qui ont vocation à être utilisées dans la fabrication des biocarburants, compte tenu des débouchés actuels très limités et soumis à des fluctuations de marché importante. Les autres graisses d'origine animale trouvent à ce jour des débouchés plus valorisants dans d'autres secteurs d'activité (alimentation humaine, alimentation des animaux de compagnie, alimentation des animaux de rente, ...), mêmes si ces derniers fluctuent eux aussi.

Tableau 37 – Utilisation actuelle des Graisses animales

Catégorie règlement CE	définition de cette catégorie	Valorisation en biodiesel ?	Valorisations	Volumes 2007 (tonnes)
C 1	Sous produits animaux avec risque d'EST, ou contaminés par des substances illégales ou dangereuses	oui, mais encore marginale	incinération, combustion, biodiesel	110 000
C 2	Sous produits animaux issus d'animaux morts présentant un risque microbiologique		incinération, combustion, biodiesel ;	
C 3	Sous produits animaux abattus déclarés sains mais non destinés à l'alimentation humaine		Alimentation d'animaux domestiques	67 000
			Alimentation d'animaux de rente (exclusion des graisses issues de ruminants)	57 000
			Alimentation d'animaux domestiques	67 000
			Oléochimie et savonnerie (export principalement)	210 000

Source : SIFCO

➤ Notion de déchet ?

Le « déchet » au sens juridique du terme, est défini par l'article L 541-1 du Code de l'Environnement sur :

- des critères matériels (résidus d'un processus de production, transformation ou utilisation de toutes substances, matériaux, produits),
- et un autre critère tiré du comportement du détenteur qui correspond à la notion de l'abandon.

Ainsi, la notion de déchet est avant tout visible dans le comportement des acteurs économiques et dans les problèmes que posent ceux-ci. Les utilisateurs d'huiles alimentaires jetaient et jettent encore pour certains, notamment les particuliers, ces huiles dans l'évier une fois utilisées. Aussi, une décision de la Commission Européenne du 3 mai 2000 (2000/532/CE) a pour vocation d'inventorier et de classer les différents déchets. Les huiles et matières grasses alimentaires sont répertoriées sous la rubrique 20 01 25 de la catégorie "Déchets municipaux et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations, y compris les fractions collectées séparément". Les graisses animales y figurent aussi. Ces dernières sont de plus encadrées par le règlement 1774/2002 "établissant les règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine". Même si le terme dédié « sous-produit » pourrait laisser penser qu'il s'agit de produits, ce règlement utilise clairement le terme de déchet pour parler à plusieurs reprises des

produits collectés, notamment dans les considérants, mais aussi dès qu'il s'agit d'élimination par incinération (cf. encadré ci-dessous). Mais tout comme les huiles alimentaires, le comportement des acteurs, qui cherchent à les abandonner, voire les cacher, ainsi que les indicateurs économiques (certaines graisses ont des prix proches de zéro, voire sont plus souvent un coût plutôt qu'un revenu) les classent clairement sous une notion de déchet.

On a donc plutôt affaire ici à une filière type recyclage. L'enjeu pour cette filière réside alors dans le choix méthodologique propre à la réalisation de cette ACV de comptabilisation ou non des impacts amont pour la seconde vie du produit. La seconde question doit servir à trancher. **Une analyse bibliographique menée sur les ACV viande et huiles a montré que quasiment aucune ne prenait en compte à l'heure actuelle ces matières comme coproduits ayant une contribution environnementale à porter. Le risque de faire disparaître entre l'aval et l'amont des impacts n'est donc pas avéré à l'heure actuelle.**

➤ Position des ACV viandes et huiles alimentaires

Un regard sur les ACV traitant du recyclage montre que lorsqu'on fait l'ACV de la seconde vie d'un produit (cf. PET recyclé), différents paramètres président au choix ou non de faire porter une partie des impacts amonts au produit. Dans des filières en cours d'élaboration, avec les étapes de recyclage en phase de développement et de recherche de valeur ajoutée pour stabiliser et améliorer la collecte, il est en général fait le choix de ne tenir compte des impacts environnementaux qu'à partir de la mise à disposition du déchet du produit précédent, i.e. à partir de la collecte seulement.

Ainsi, au vu du contexte actuel, il paraît envisageable d'attribuer une charge amont nulle à ces produits au stade de leur collecte, les considérant comme produits fatals sans valeurs marchandes. Cela traduit un contexte donné où la valeur et l'utilisation de ces matières ne sont pas encore stabilisées et assurées, et où les graisses C3 notamment ne seront que très peu mobilisées (voir tableau 36 des capacités de production qui devraient voir le jour ces prochaines années). Cela signifie qu'un jour, il faudra probablement revoir ce choix lorsque ces produits seront devenus indubitablement des coproduits de leur filière amont.

Enfin, il est intéressant de souligner que l'objectif de cette étude est de comparer des filières de biocarburant entre elles et par rapport à leurs filières fossiles de référence. Il semble cependant que pour ces filières aux volumes limités et aux produits atypiques, plus que le positionnement au sein d'autres filières carburants, l'enjeu aujourd'hui résiderait plutôt dans la comparaison avec d'autres filières de fin de vie envisageables (cogénération ? alimentation animale ? savonnerie ?).

En revanche, et avec en arrière plan cette optique de filières de fin de vie, les étapes de collecte et de préparation (notamment la cuisson) doivent être intégrées aux émissions de ces filières. Car dès sa collecte, cette matière redevient un produit dont il faut optimiser la fin de vie. Si ce point est évident pour les huiles alimentaires, il pose question pour les graisses animales du fait d'étapes de traitement des sous-produits animaux nécessaires pour arriver à un produit valorisable qu'est la graisse (notamment collecte, broyage, cuisson et presse pour séparer les constituants). Ces étapes servent de plus différents objectifs : neutraliser au niveau sanitaire ces produits et les séparer en constituants ayant une certaine valeur (graisses, farines). Devant la difficulté d'arbitrer entre une attribution à l'amont agricole des charges de traitement de ses déchets ou à l'aval ayant la responsabilité de valoriser au mieux ces produits, il a été fait le choix de présenter en filière principale la filière graisse animale sans l'étape d'obtention des graisses à partir des sous-produits en s'appuyant sur une position de la Commission Européenne. Une quantification du même bilan intégrant ces étapes est cependant également proposée dans les résultats.

Tableau 38 – capacités de production EMGA et EMHAU dans les prochaines années

	Total production estimée
	Kt/an
Démarrage 2008	0
Démarrage 2009	45
Démarrage 2010	110
Total 2010	155

Source : enquête réalisée par BIO IS auprès des acteurs de ces filières

Soulignons que ces données comprennent les deux filières (EMGA – EMHAU) et une estimation des projets à dominante EMHV ayant déclaré vouloir mobiliser aussi des huiles usagées.

Ainsi la capacité de production installée prévisionnelle s'élève à 155 kt : on voit que ces filières resteront de taille limitée et représenteront moins de 5% du marché du biodiesel en France.

4.6.2. MODELISATION DES ETAPES A PRENDRE EN CONSIDERATION

➤ **Spécificités de ces filières**

Ces deux matières premières ont la caractéristique de provenir de différentes sources et nécessitent une vigilance spécifique quant à leur normalisation. La pureté des graisses animales dépend par exemple d'une collecte, d'un traitement d'extraction rapide afin d'éviter des dégradations diverses ou le développement microbien. La teneur en eau de ces produits doit aussi être réduite et contrôlée, ce qui nécessite une décantation pour les huiles alimentaires (cet élément est contrôlé lors de la fabrication des graisses animales). Les graisses animales sont solides à température ambiante. Elles nécessitent un préchauffage léger pour leur utilisation, dont l'impact reste quasi-inexistant sur la chaleur consommée.

Mais la différence principale provient d'une acidité supérieure, surtout pour les graisses animales (5 à 15% d'acidité oléique), nécessitant un prétraitement par estérification acide avant la transestérification. Cette réaction en présence de méthanol et de catalyseur acide ramène l'acidité en dessous de 1%, niveau autorisant la catalyse basique. Le rendement est ainsi maintenu à des niveaux élevés (> 96%) grâce à cette transformation de l'acidité (acides gras libres) en ester méthyliques.

➤ **Frontières du système**

Les frontières décrites de manière générique pour les biocarburants s'appliquent ici. La frontière amont d'entrée des graisses animales traitées dans le système peut faire débat. La matière peut être considérée produite à partir de la sortie d'abattoir des sous-produits animaux (ou de ramassage des carcasses dans le cas de l'équarrissage) et donc les charges afférentes à la préparation de la graisse à partir de ces sous-produits intégrés à l'aval. L'approche considérant que ces charges sont à imputer à l'amont agricole, étant donné qu'il s'agit de neutraliser au niveau sanitaire les déchets de la filière viande et de préparer la matière, est aussi défendable.

Cette étude a fait le choix de considérer comme résultat principal la quantification de la filière sans ces coûts de traitement des sous-produits et préparation des graisses, s'appuyant sur une position de la commission européenne communiquée au SIFCO sur cette question. Toutefois, par souci de transparence, des valeurs intégrant cette étape sont aussi présentées pour illustrer l'impact de ce choix.

➤ Synthèse et représentativité

Le tableau suivant présente les frontières du système à travers les étapes prises en compte dans la quantification de ces filières. Sur les filières huiles alimentaires, le site et la technologie sont désormais connus. Ce travail utilise les valeurs réelles transmises par VEOLIA Environnement. Pour les filières graisses animales pour lesquelles il n'existe pas de site en production en France à ce jour, la modélisation s'appuie sur les procédés employés actuellement en Allemagne et quantifiés par BIO à partir du croisement d'informations. Un des sites français devrait utiliser une technologie innovante et pourrait ainsi ne pas être représenté par ce calcul.

Tableau 39 – synthèse de la modélisation des EMGA et EMHAU

	Huiles usagées	Graisses animales
Amont à la production du déchet	(fabrication et utilisation de l'huile) Non pris en compte	(Production de viande) Non pris en compte
Production de la matière valorisable	/	(broyage, cuisson, presse) Non pris en compte dans la filière principale Quantification afin d'illustrer l'impact potentiel de choix
Collecte	Collecte	Collecte
Stockage, préparation	dégrillage, décantation, énergie nécessaire	Pas de coûts de stockage car stockage très court et mobilisant des résidus de chaleurs
Prétraitements	gestion acidité : pré-estérification acide	gestion acidité : pré-estérification acide
Transestérification	Catalyse homogène, Utilisation d'une base plus forte (hydroxyde de potasse)	Catalyse homogène, Utilisation d'une base plus forte (hydroxyde de potasse)
Post-traitements	Lavage à l'eau	Distillation obligatoire (rôle d'épuration)
coproduits	Un coproduit supplémentaire : sulfate de potassium	Un coproduit supplémentaire : sulfate de Potassium

4.7. CHANGEMENT D’AFFECTATION DES SOLS

4.7.1. PRINCIPE :

Devant l’absence de modélisation faisant référence sur ces sujets, il ne semble pas envisageable dans le cadre de cette étude de développer un modèle et proposer des valeurs qui fassent référence. Ainsi, le principe retenu est d’aborder cette question de manière plus modeste à travers une analyse de sensibilité servant à alerter des impacts potentiels que peuvent prendre les biocarburants via ces questions de changements des sols. **Ainsi, les résultats présentés dans cette étude n’intègrent pas ces changements, sauf dans les tableaux de mise en perspective et dans le chapitre 8 d’analyse de sensibilité dont une sous partie est dédiée à ce sujet.**

L’analyse de sensibilité consiste à introduire des valeurs d’émission sensées représenter des effets attribuables aux biocarburants. Elles doivent s’appuyer sur des valeurs ayant une certaine crédibilité.

Les tableaux ci-dessous décrivent les valeurs introduites dans cette analyse. Les scénarii potentiels que ces valeurs pourraient traduire sont décrits plus en détail ci-dessous. Les données ayant servi de référence y figurent aussi. Quelques exemples de calcul de ces ordres de grandeurs sont proposés au sein du chapitre d’analyse de sensibilité sur ce paramètre.

Un travail approfondi d’analyse de scénario a été réalisé lors d’une thèse de master en suisse en 2008 pour intégrer par une approche d’ACV conséquentielle les impacts indirects liés à la production d’EMHV de colza en Suisse [EMPA 2008]. Fruit d’un travail plus poussé de réflexion sur ces effets, il est intéressant de noter que dans la plupart des simulations faites, les effets sont plutôt favorables pour l’ester méthylique étudié. Certains scénarii ici présentés s’en sont inspirés.

Attention, ces valeurs ne prétendent pas être la traduction quantifiée de la réalité actuelle et doivent être lues comme des scénarii envisageables construits sur des valeurs de stock de carbone moyen par type de culture et des hypothèses de premiers ordres sur des effets de remplacements d’aliments. Les moteurs économiques et politiques causant ces changements ne sont notamment pas abordés ici.

4.7.2. RAPPEL SUR LES RECOMMANDATIONS DU REFERENTIEL METHODOLOGIQUE :

Tableau 40 – Récapitulatif des recommandations pour le CAS direct

Zone géographique	Changement direct d’Affectation des Sols	Prise en compte dans l’ACV ?
Europe	Supposé nul	Pas de changement d’affectation dans le cadre d’une production européenne de biocarburants issus de cultures européennes
Amérique du Nord	Fortes incertitudes	En l’absence d’études permettant de définir un scénario de référence de CAS direct, il est proposé d’approfondir les
Amérique du Sud		

Zone géographique	Changement direct d'Affectation des Sols	Prise en compte dans l'ACV ?
Asie		études pour définir un mode de prise en compte explicite de ces potentiels changements d'usage directs des sols, indispensable pour une évaluation exhaustive des impacts potentiels des biocarburants. Si, grâce à des travaux particuliers, il est possible de définir un scénario de CAS robuste, l'étude doit d'ores et déjà en tenir compte.

Tableau 41 - Récapitulatif des recommandations pour le CAS indirect

Zone géographique	Changement indirect d'Affectation des Sols	Prise en compte dans l'ACV ?
Europe	Fortes incertitudes	En l'absence d'études permettant de définir un scénario de référence de CAS indirect, par défaut, il est proposé d'approfondir les études existantes dans l'objectif d'aboutir à un mode de prise en compte explicite. Si, grâce à des travaux particuliers, il est possible de définir un scénario de CAS robuste, l'étude doit d'ores et déjà en tenir compte.
Amérique du Nord		
Amérique du Sud		
Asie		

Les deux tableaux suivants décrivent les données de référence pour réaliser ces estimations.

Tableau 42 : données de référence utilisées : stock de carbone par type de culture

Surface	TOTAL	Stock de carbone dans le sol	Stock de carbone sur et sous le sol
			tonnes C.ha-1
Forêt tempérée	136,3	63	73,3
Forêt tropicale	247,5	60	187,5
Savane	116,5	35	81,5
Prairies	69,3	63	6,3
Culture	51,9	46,9	5
canne à sucre	85	60	25
Culture pérenne (Palmiers à huile)	110	60	50

Source : référentiel ACV biocarburant, 2008, issu d'une synthèse des possibilités de calcul ICPP.

Tableau 43 : données de référence utilisées : données culture

EMHV	Grains / fruits	tourteau	taux protéique	Esters	Ethanols	agricole	taux protéiques	éthanol
	tonne grain/ha	Tonne tourteau/ha	kg protéines/kg tourteau humide	t emhv/ t grain		tonne grain/ha	kg protéines/kg tourteau humide	t éthanol/ t grain
colza	3,3	1,85	0,34	0,4	blé	7,5	0,3	0,30
soja	2,6	2	0,44	0,18	maïs	8,8		0,34
tournesol	2,4			0,4	betterave	72		0,080
palme	20	0,657	0,15	0,19	canne à sucre	68,7		0,07

Source : BIO IS + [EMPA, 2008] pour les protéines

Les équivalences basées sur les taux protéiques sont des simplifications de la réalité, un aliment étant aussi caractérisé par ses propriétés énergétiques, ses contenus en acides gras,... Pour les besoins de ce travail et compte tenu de comportements différents des animaux par rapport à ces éléments, ce niveau de précision n'a pas été recherché.

4.7.3. CHANGEMENT D'AFFECTATION DIRECT

Il correspond à la conversion d'une surface cultivée ou non vers une culture qui sera destinée à la production de biocarburants (ex: forêt convertie pour la culture de biocarburant).

Les EMHV d'huile de palme et de soja brésilien, ainsi que l'éthanol de canne à sucre sont concernés.

Les impacts sur l'utilisation des sols se font via la concurrence directe sur le sol, la plantation de canne sur des surfaces occupées par différents types d'espaces auparavant, dont les plus pénalisantes pour les émissions de gaz à effet de serre sont les forêts primaires et les sols tourbeux. Il peut aussi se produire des déplacements indirects d'autres cultures dans un contexte de disponibilités foncières limitées et de demande ne faiblissant pas (soja par exemple). Mais on peut aussi imaginer des scénarii où le stockage de carbone augmente par le biais de l'étendue des plantations pérennes sur des terres anciennement en culture et aujourd'hui dégradées. Les données issues des tableaux précédents sont mobilisées pour estimer, pour un hectare de biocarburant cultivé, les émissions de GES qu'il a entraîné au sein des scénarii considérés.

Le tableau ci-dessous synthétise les valeurs trouvées. Ces valeurs sont ajoutées aux bilans calculés par cette étude et sont présentées dans des figures spécifiques pour chaque filière. Par défaut, si rien n'est mentionné, les résultats n'intègrent pas ces changements. Un scénario maximal n'attribuant qu'au biocarburant les émissions de ces changements est présenté en premier lieu dans ces figures (cas sans augmentation de coproduits alimentaires). Puis les valeurs suivantes, qui découlent des scénarii décrits ci-dessous, sont données avec allocation des émissions de la déforestation entre le biocarburant et son coproduit alimentaire (cas d'une augmentation de la production de coproduits).

Les études disponibles sont de plus en plus nombreuses sur le sujet. Mais aucune ne semble encore s'imposer comme vision consensuelle de la manière de calculer ces impacts. Notamment, la réflexion sur le calcul des émissions réelles ou sur l'allocation de ces émissions entre les différents moteurs de la déforestation semble encore à approfondir. Le contexte de prise de conscience sur ces enjeux peut aussi rendre progressivement obsolète des données de la décennie 2000. Ainsi, dans l'optique de la recommandation du référentiel 2008, les résultats principaux sur la palme, le soja et la canne à sucre n'intègrent pas cet impact. Il est présenté dans le chapitre 8 visant à mettre en relief ces données, après introduction des valeurs ci-dessous.

Tableau 44 – Valeurs pour le changement direct d'affectation des sols

Par ha de biocarburant considéré	Ethanol de Canne à Sucre kg eCO ₂ /ha/an	Ester d'Huile de Palme kg eCO ₂ /ha/an	Ester de Soja brésilien kg eCO ₂ /ha/an
Ordre de grandeur maximal	27 000	23 000	32 000
Ordre de grandeur scénarii intermédiaires	10 000	7 000	12 000
Ordre de grandeur scénarii modérés	3 000	1 500	5 000
Scénarii optimistes	-6 000 à -2 000 (valeur utilisée pour le calcul : -4 000)	-10 000 à -2 000 (valeur utilisée pour le calcul : -6 000)	0

Des descriptifs de scénarii pouvant conduire à ces ordres de grandeurs sont proposés ci-dessous.

4.7.3.1 Description des scénarii pour l'ordre de grandeur maximal

Cette situation correspondrait au remplacement d'un ha de forêt primaire tropicale humide par un hectare de canne à sucre ou de palmier à huile, en supposant que toutes les émissions de CO₂ générées seraient affectées à la canne à sucre avec un lissage sur 20 ans. Pour le palmier à huile, on peut noter que l'effet de la déforestation serait plus réduit que pour la canne à sucre du fait de plusieurs facteurs :

- un stockage plus important de carbone dans la culture,
- la substitution par son coproduit, le tourteau de palmiste, de tourteaux de soja eux-mêmes potentiellement issus d'ex forêts humides. En effet, 1 ha de palmier produit l'équivalent en tourteau de 0,17 ha de soja en matière de tourteaux et compense avec 10% de sa production la production d'huile de soja non produite.

Pour le soja, ce scénario correspondrait aussi au défrichement d'un hectare de forêt primaire, une partie cependant étant compensée par le tourteau supplémentaire mis à disposition. Attention, il s'agit ici d'une part seulement du soja importé en Europe, seul le soja Brésilien étant porteur de CAS direct.

4.7.3.2 Description des scénarii intermédiaires

Ces valeurs correspondraient au remplacement d'un ha de forêt dégradée par un hectare de canne à sucre ou de palmier, où toutes les émissions de CO₂ seraient affectées à la canne avec un lissage sur 20 ans. Il convient aussi pour des panachages plus mixtes entre forêts primaires, avec partiellement des sols tourbeux, et des terres en cultures.

4.7.3.3 Description des scénarii modérés

Pour la canne à sucre et le palmier à huile, cette configuration pourrait être atteinte dans les conditions suivantes. Contrairement au scénario maximal, il ne s'agit plus de substituer en totalité l'huile nécessaire pour la fabrication d'EMHV, mais seulement 80% de celle-ci par de l'huile de palme. 50% de cette production de remplacement s'effectuerait sur de nouvelles terres prises sur d'anciennes forêts tropicales. Les 50 autres pourcents s'effectueraient sur les terres déjà cultivées, grâce à une augmentation de rendement de production agricole à l'hectare. On allouerait seulement 50% des émissions correspondantes de CO₂ à la culture de palmier à huile, le reste étant alloué à l'exploitation du bois ou à une culture intermédiaire. Un autre scénario peut découler d'un panachage moins pénalisant sur l'origine des terres remplacées.

Pour le soja, on peut imaginer ici des scénarii plutôt basés sur des effets de déplacement indirects via le remplacement de la nouvelle huile de soja utilisée en biocarburant par de l'huile de palme (voir effet indirects).

4.7.3.4 Description des scénarii optimistes

Notons qu'on peut aussi imaginer des scénarii à changement d'affectation des sols quasi nuls, voire négatifs, si les cultures de canne à sucre ou de palmiers à huile viennent remplacer en partie ou partiellement des terres arables cultivées trop dégradées ou moins rentables. Pour le soja, il peut être considéré que la culture s'est effectuée sur des terres déjà déforestées, mais permet grâce au

tourteau produit de ne pas déforester un hectare équivalent (ou un peu moins) qui aurait pu l'être dans le cas d'une demande croissante d'aliments du bétail.

4.7.4. CHANGEMENTS D'AFFECTATION INDIRECTS

Une culture énergétique dont la matière première approvisionne des usines de biocarburant remplace des terres autrefois dédiées à des cultures alimentaires. La culture alimentaire devra être produite ailleurs dans l'hypothèse d'un maintien d'un même niveau de consommation alimentaire.

L'impact indirect se fait ici via le besoin d'alimenter le marché de l'huile par de nouveaux produits et donc une augmentation plus ou moins marquée des besoins en surface cultivée. Cela conduit en général à des émissions nettes de gaz à effet de serre en raison de prise de terre sur les forêts. Des scénarii à effet bénéfique peuvent être aussi imaginés avec le remplacement d'importations de tourteaux de soja grâce aux tourteaux de colza. Selon le devenir des terres non mobilisées pour le soja, le gain peut être plus ou moins important.

En matière d'éthanol, des niveaux de déplacement analogues peuvent être considérés. Ainsi, par exemple, le sucre non produit en Europe en raison de la production d'éthanol pourrait être importé depuis des productions de canne à sucre. Les drèches et les pulpes peuvent venir remplacer des importations de soja.

A partir des données d'émissions d'équivalent CO₂ par de changements types de couvert végétal, nous avons construits plusieurs scénarii simples et théoriques illustrant la gamme de valeur que pourrait prendre cet effet. Ainsi, on se propose d'injecter en analyse de sensibilité les niveaux potentiels d'émission suivants liés à ces changements. Des explications sur la manière d'aboutir à de tels ordres de grandeur sont proposées dans les paragraphes suivants.

On peut noter une différence de niveau pour les esters méthyliques entre CAS direct et indirect alors qu'ils sont assez proches, voire identiques pour les éthanol. Cela résulte des différences intrinsèques entre effet direct et indirect : dans le cas de l'effet direct et pour le scénario le plus défavorable considéré, un hectare de palme remplace un hectare de forêt primaire et donne donc un surcoût GES à l'hectare très fort. Dans le cas du changement indirect, c'est un kg d'huile qu'il convient de remplacer. Les différences de rendement d'huile à l'hectare entre colza et palme font que l'hectare de colza cultivé en France n'a besoin au maximum que de 0,20 hectare en zone potentielle de déforestation.

Tableau 45 – Valeurs pour le changement d'affectation des sols indirects

Par ha de biocarburant considéré	Esters méthyliques kg CO ₂ /ha/an	Ethanol kg CO ₂ /ha/an
Ordre de grandeur maximal	7 500	27 000
Ordre de grandeur scénarii pessimistes intermédiaires	3 000	10 000
Ordre de grandeur scénarii pessimistes modérés	800	3 000
Ordre de grandeur de scénarii optimistes modéré	-1000	-1 000
Ordre de grandeur de scénarii très optimistes (basés sur les tourteaux)	-10 000 à - 2 000 (valeur utilisée pour le calcul : -6 000)	-8 000 à - 2 000 (valeur utilisée pour le calcul : -4 000)

4.7.4.1 Description des scénarii maximum

Ce scénario correspondrait au remplacement d'un kg d'huile utilisée en EMHV par 1 kg d'huile de palme produite entièrement sur des zones de forêts tropicales humides exploitées pour laisser place à cette culture. Par ailleurs, on affecterait à cette culture l'ensemble des émissions de CO₂ générées, avec un lissage sur 20 ans. 90 % de l'écart en carbone entre les 2 types de culture est supposé provenir directement du CO₂ ou du méthane lors de l'exploitation, le reste étant contenu dans le bois d'œuvre ultérieurement scié et exploité. Le tourteau de palmiste supplémentaire évite la production de tourteau de soja et réduit marginalement le besoin en surfaces nouvelles (-17% de la surface de palme plantée).

Un autre scénario pourrait consister en la situation suivante : 10% de l'huile de palme serait produite sur d'anciennes tourbières, 50% sur des forêts tropicales humides coupées pour cultiver la palme, et 40% en remplacement de forêts dégradées⁸ ou d'anciennes cultures.

Pour l'éthanol de betterave, il s'agirait du remplacement d'un kilogramme de sucre par un kilogramme de sucre de canne, elle-même cultivée sur de la forêt tropicale humide dans les mêmes conditions que décrites pour les palmiers à huile.

4.7.4.2 Ordre de grandeur scénarii intermédiaires

Ils peuvent être construits sur les bases suivantes. Contrairement au scénario maximal, il ne s'agit plus de substituer en totalité l'huile nécessaire pour la fabrication d'EMHV, mais seulement 80% de celle-ci par de l'huile de palme. 50% de cette production de remplacement s'effectuerait sur de nouvelles terres prises sur d'anciennes forêts tropicales. Les 50 autres pourcents s'effectueraient sur les terres déjà cultivées, grâce à une augmentation de rendement de production agricole à l'hectare. 100% des émissions de CO₂ résultantes sont allouées à la culture de palmier à huile. Il n'est pas comptabilisé d'autres responsabilités de ces émissions via une allocation à la culture du bois ou à d'autres causes de défrichement.

Cette valeur peut aussi plus simplement découler du scénario maximal précédent pour lequel le remplacement aurait lieu en fait à partir de terres ayant en moyenne le contenu carbone d'une forêt tempérée. Les mêmes approches ont été prises pour des remplacements de production de sucre à partir de canne à sucre au lieu de betterave.

4.7.4.3 Ordre de grandeur scénarii modérés

Il peut être construit à partir du cadre du scénario intermédiaire, en changeant certains paramètres :

- lissage des émissions de CO₂ sur 50 ans au lieu de 20 ans
- contenu carbone des forêts remplacées équivalent à celui de forêts tempérées (mixte entre forêts primaires, anciennes forêts dégradées, et terres déjà cultivées)

⁸ Forêts ayant repoussées spontanément sur d'anciennes terres déboisées ou partiellement exploitées, moins fournies en carbone que les forêts primaires jamais exploitées. On estime qu'elles ont un niveau équivalent de stockage carbone d'une forêt tempérée, ce qui est plutôt optimiste.

- taux de compensation plus élevé (90%) de l'augmentation de la demande par l'augmentation du rendement à l'hectare

A partir du premier jeu d'hypothèses de calcul du scénario intermédiaire, on peut atteindre cette configuration si l'on considère que seulement 20% des nouvelles surfaces à mobiliser viennent de forêts primaires humides, le reste étant du remplacement de terres en culture. Par rapport à la betterave sucrière et son remplacement par de la canne à sucre, un tel scénario peut aussi être la conséquence d'une allocation au sucre d'une partie des conséquences du défrichage, du fait d'une situation de production globale liée à des décisions politiques (réforme de l'OCM sucre) en premier lieu.

4.7.4.4 Ordre de grandeur de scénarii optimistes modéré

Ils sont basés sur des changements d'affectation des sols via les coproduits. Un tel stockage de carbone se produirait si on imaginait que 10% des terres cultivées initialement en soja remplacées par le tourteau de colza étaient laissées à l'abandon (forêt secondaire en devenir) ou replantées en palmier à huile. Le taux de remplacement est basé sur la valeur protéique : 1 kg de tourteau de colza remplaçant 0,75 kg de tourteau de soja ; 1 kg de drèches remplaçant 0,65 kg de soja.

4.7.4.5 Ordre de grandeur de scénarii très optimistes

Ils sont les mêmes bases que les scénarii optimistes modérés, mais en supposant des parts de 50 à 100% de surfaces anciennement en soja se re-végétalisant.

5. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES FILIERES

Cette partie a été imaginée comme intermédiaire entre le descriptif générique des choix méthodologiques, développé dans le chapitre 4 et la présentation des résultats. Elle vise à synthétiser sous forme de fiches les éléments particuliers afférents à chaque filière.

Ces éléments reprennent et complètent ce qui a pu être développé de manière transversale dans le chapitre 4. Elle apporte de plus quelques grandeurs de référence permettant à un lecteur averti de positionner les valeurs utilisées, ou au lecteur plus novice d'avoir des ordres de grandeurs en tête.

L'ensemble des valeurs utilisées, leur incertitude ou variabilité et leurs sources sont détaillés en annexe 2.

5.1. FILIERES FOSSILES DE REFERENCE

5.1.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> Production d'essence et de gasoil à partir d'une raffinerie moyenne européenne.
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> Données UFIP pour modéliser l'approvisionnement moyen France, puis inventaires ECOINVENT du pétrole brut pour chaque grande zone d'extraction Données JEC pour l'énergie et le CO₂ de l'étape raffinage et valeurs moyenne France pour les autres polluants à partir du registre des polluants iREP Données IFP pour la distribution
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> Voir figure 9

5.1.1.2 Détail des allocations

L'approche retenue évite la question des allocations entre l'essence et le diesel par rapport aux nombreux coproduits issus du pétrole brut au niveau d'une raffinerie. L'utilisation des travaux de l'étude JEC 2007 attribue par calcul incrémental les charges à imputer à la production du gasoil et de l'essence (i.e. l'écart des consommations et des émissions totales de la raffinerie résultant d'une augmentation de production de y tonne d'essence par exemple).

Tableau 46 – Bilans EF et GES des carburants pétroliers - Résultats de l'étude [JEC 2007]

Données considérées dans l'étude JEC 2007	Gazole	Essence
Consommation d'énergie	0,10 MJ / MJ	0,08 MJ / MJ
Emissions de GES	8,6 g eqCO ₂ / MJ	6,5 g eqCO ₂ / MJ

5.1.1.3 Scénario prospectif

Pas de changement dans les consommations et les émissions des étapes d'extraction, de raffinage et de distribution pour les produits des raffineries (gazole, essence, isobutène).

5.1.1.4 Quelques données de référence

PCI pétrole brut : 42,3	PCI diesel : 43,1	PCI essence : 43,2
Données de l'IFP sur la distribution aval	Chaque litre parcourt en moyenne en France 109 km de camion, 17 km en transport fluvial, 69 par train et 113 km par pipeline.	
Exemple d'émissions de polluants de l'étape de	Les 13 raffineries françaises ont déclaré avoir émis 11 millions de tonne d'équivalent CO ₂ en 2007. Un MJ supplémentaire de	

raffinage : le CO ₂	diesel émettrait 8,6g eqCO ₂ . Ainsi, un MJ diesel s'est vu attribuer (8,6g / 11million tonne) éme des impacts du raffinage.
Exemple d'émissions de polluants de l'étape de raffinage : 1,3 butadiène	Les 13 raffineries françaises ont déclaré avoir émis 39 tonnes de 1,3 butadiène en 2007. En appliquant le facteur suivant de répartition, cela représente 0,89 µg/kg de diesel.

5.1.1.5 Autres éléments spécifiques de la modélisation

Une hypothèse communément admise pour les ACV de carburants fossiles est de considérer que 1 MJ de pétrole brut en entrée produit 1 MJ de carburant. Cela est rendu possible :

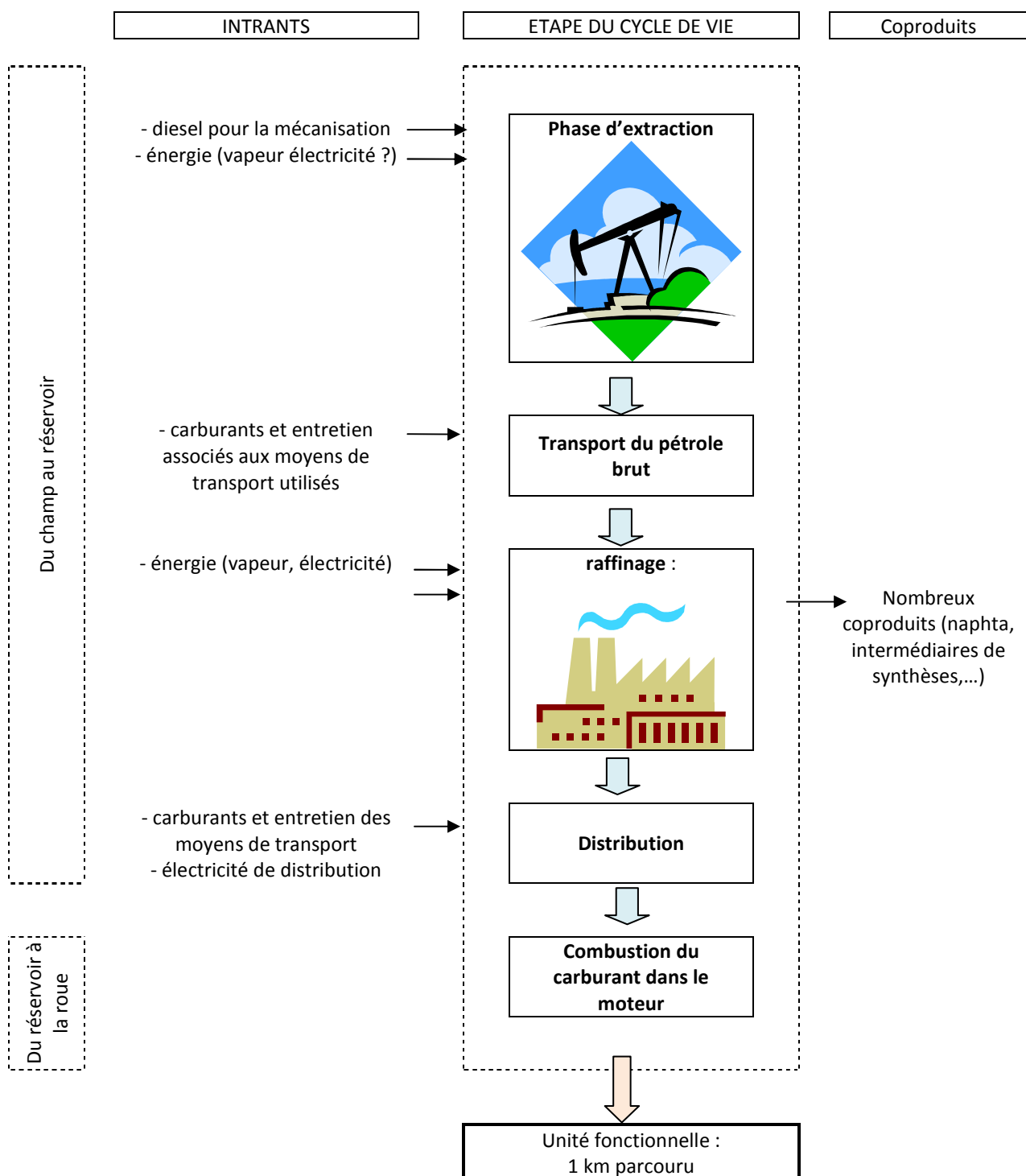
- d'une part, par la proximité des contenus énergétiques (PCI très proches),
- d'autre part par le fait que les produits consommés sur le site de raffinage à des fins énergétiques se voient eux aussi attribuer un amont d'extraction à hauteur d'un MJ de pétrole brute par MJ brûlé lors du raffinage.

L'énergie de raffinage de 0,10 et 0,08 MJf/MJ respectivement pour le diesel et l'essence a été estimée provenir pour moitié de gaz naturel et pour moitié de produits du raffinage brûlés sur site.

L'étape « industrielle » des bilans présentés correspond au raffinage. Elle intègre aussi l'énergie et les émissions nécessaires à l'extraction de l'énergie consommée sur le site, d'où le fait qu'elle apparaisse supérieure à 0,10 et 0,08 MJf/MJ⁹.

⁹ L'étude JEC a elle fait le choix de mentionner ces valeurs dans le poste « extraction ».

Figure 9 – Description du cycle de vie des filières essence et gasoil



5.2. FILIERE EMHV DE COLZA :

5.2.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production française, • extraction d'huile et estérification France • Raffinage chimique en catalyse homogène, séparation de l'ester et de la glycérine par lavage à l'eau
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Origine : CETIOM pour la phase culture et extraction d'huile, et données PROLEA pour l'estérification France • Estimation de validité : France 2007 – 2010
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • Voir schéma en fin de section

5.2.1.2 Détail des allocations

Tableau 47 – Allocations pour la filière colza

Filière COLZA			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Culture -> extraction huile	huile brute	allocation au prorata énergétique	64%
	Tourteau		36%
Semi-raffinage	huile neutre	allocation au prorata énergétique	98%
	huiles acides		2%
Estérification	biodiesel	allocation au prorata énergétique	94%
	glycérine		5%
	huiles acides		1%
Distribution	biodiesel		100%

5.2.1.3 Scénario prospectif

Tableau 48 – Scenarii prospectifs pour la filière colza

Scenarii prospectifs COLZA			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
pas de progression marquée du non labour	mécanisation	0%	% sur 5 ans
baisse légère de l'usage des pesticides	atteinte de la moitié de l'objectif ECOPHYTO	-25%	% sur 5 ans

stabilité sur les rendements (grande variation + plan Ecophyto)	Données de rendements	0%	% sur 5 ans
amélioration génétique, pratiques :	baisse apports engrais N	-5%	% sur 5 ans
Généralisation des pratiques favorisant les repousses	lessivage divisé par 2 (<i>cette hypothèse peut être jugé optimiste</i>)	-50%	% sur 5 ans
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
légers gains sur l'extraction d'huile	améliorer le rendement extraction d'huile : +1 point d'huile extraite	Rendement de trituration d'environ 43%	% sur 5 ans
légers gains sur l'extraction d'huile	baisse masse tourteaux	-1%	% sur 5 ans
légers gains sur l'extraction d'huile	Baisse de l'énergie	-10%	% sur 5 ans
partie demulsification : raffinage enzymatique	baisser l'énergie	-20%	% sur 5 ans
Généralisation de la cogénération biomasse	Diminution de l'énergie gaz consommée	-33%	% sur 5 ans
Généralisation de la cogénération biomasse	diminution de l'énergie électrique achetée	-13%	% sur 5 ans

5.2.1.4 Quelques données de référence

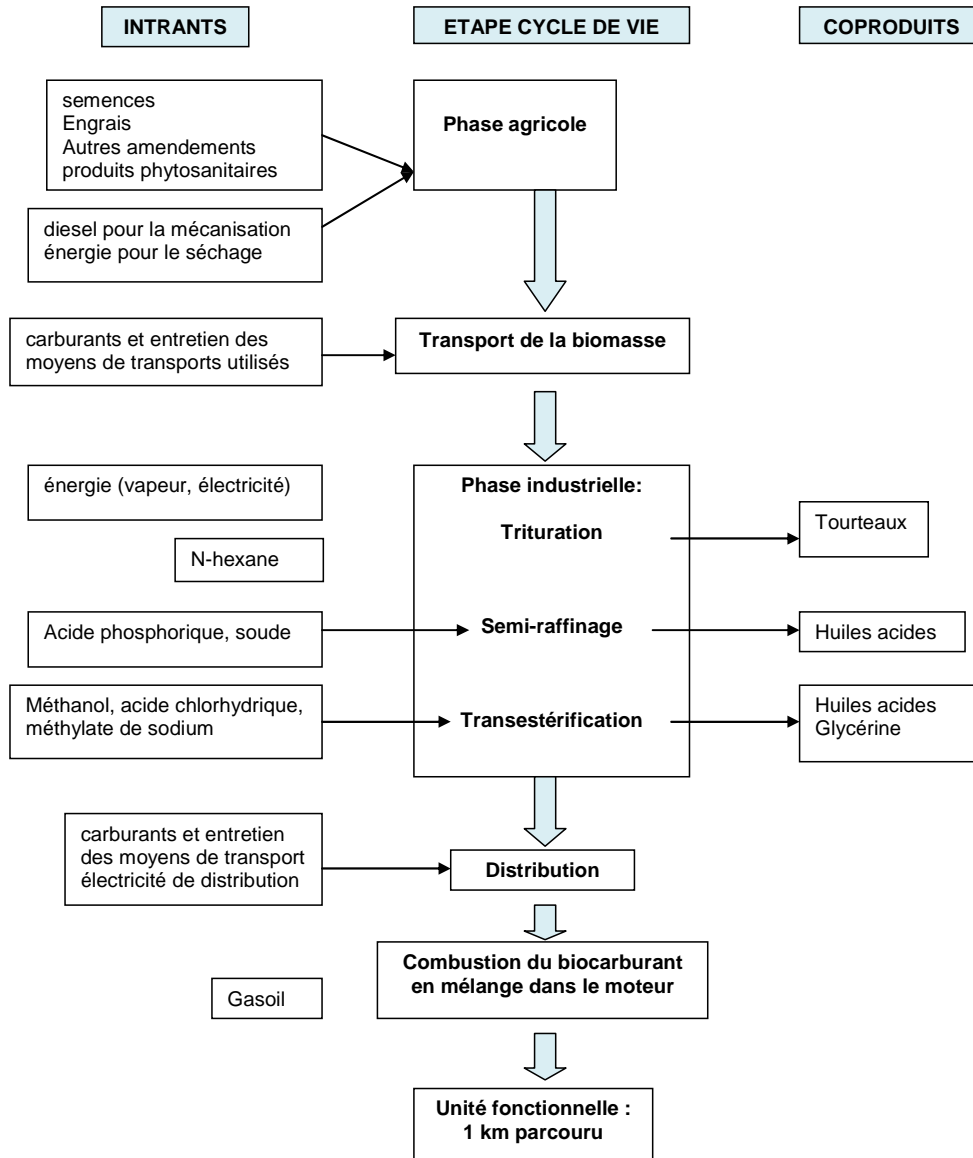
Rendements	<ul style="list-style-type: none"> 32,8 quintaux de grains à 9%/ha Environ 1 350 kg EMHV / ha
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 188 unités d'azote apportées/ ha/ an (engrais organique inclus) ; 68 litre/ha/an de mécanisation ; apports de soufre et ventilation pris en compte
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> Consommation en gaz naturel, avant allocation : 0,075 MJf/MJ d'EMHV Consommation en électricité, avant allocation : 0,02 MJe/MJ d'EMHV Si procédé de distillation pour séparer l'EMHV: rajouter 0,02 et 0,03 MJf/MJ de Gaz naturel Consommation de méthanol : 95 kg/tonne EMHV ; Utilisation de méthylate de sodium ;

5.2.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

- Les données agricoles « moyenne française » ont été estimées représentatives de l'approvisionnement réel des sites, disséminés partout en France.
- La France possède à travers Sofiproteol un acteur intégré dans les huiles, ce qui n'est pas le cas d'autres pays européens. Beaucoup d'unités de biodiesel opérant en Allemagne, autre grand producteur de biodiesel, font l'extraction de l'huile, mais pas à l'hexane, en se limitant à un traitement à chaud, le rendement en huile est de ce fait plus bas.
- Le lavage à l'eau de l'ester élimine la glycérine et le surplus de méthanol. Que le procédé soit avec distillation ou avec lavage à l'eau, il y a dans les 2 cas une étape de décantation pour séparer la glycérine et l'EMHV. La glycérine obtenue à cette étape a une pureté de l'ordre de 90%. La distillation ou lavage à l'eau qui suit l'étape de décantation a pour but d'éliminer les

traces de glycérine restant dans l'EMHV après décantation. Dans le cas d'un lavage à l'eau, l'effluent riche en glycérine est recyclé dans la glycérine issue de la décantation. Cette solution a l'avantage de réduire les pertes en glycérine. En revanche, elle dilue le produit fini dont la teneur en glycérine est de l'ordre de 80 - 85%¹⁰.

Figure 10 – Présentation synthétique du périmètre retenu, colza et tournesol



¹⁰ Il est fait l'hypothèse que l'eau nécessaire à l'extraction des traces de glycérine et de méthanol est recyclée et s'enrichit progressivement en glycérine avant d'être mélangée à la glycérine obtenue par décantation. Cela explique la faible dilution que cette seconde source crée.

5.3. FILIERE EMHV DE TOURNESOL

5.3.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production française, • extraction d'huile et estérification France • Raffinage chimique en catalyse homogène, séparation de l'ester et de la glycérine par lavage à l'eau
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Origine : CETIOM pour la phase culture et extraction d'huile, et données PROLEA pour l'estérification France • Estimation de validité : France 2007 – 2010
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • Voir schéma en fin de section

5.3.1.2 Détail des allocations

Tableau 49 – Allocations pour la filière tournesol

Filière TOURNESOL			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Culture -> extraction huile	huile brute	allocation au prorata énergétique	65%
	tourteau		35%
Semi-raffinage	huile neutre	allocation au prorata énergétique	98%
	huiles acides		2%
Wintérisation	huile neutre pure		100%
Estérification	biodiesel	allocation au prorata énergétique	94%
	glycérine		5%
	huiles acides		1%
Distribution	biodiesel		100%

5.3.1.3 Scénario prospectif

Tableau 50 – Scenarii prospectifs pour la filière tournesol

Scenarii prospectifs TOURNESOL			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
Progression du non labour	mécanisation	0%	% sur 5 ans
baisse légère de l'usage des pesticides	atteinte de la moitié de l'objectif ECOPHYTO	-25%	% sur 5 ans
stabilité sur les rendements (grande variation + plan Ecophyto)	Données de rendements	0%	% sur 5 ans
amélioration génétique, pratiques :	baisse apports engrais N	-5%	% sur 5 ans
CIPAN	diminution du lessivage	-50%	% sur 5 ans

Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
voir Colza pour cogénération			
pas de gain en rendement huile			

5.3.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> 23,9 quintaux de grains à 9%/ha Environ 1 000 kg EMHV / ha
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> 38 unités d'azote apportées/ ha/ an (pas d'apports organiques) ; 66,8 litre/ha/an de mécanisation ; ventilation prise en compte
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> Consommation en gaz naturel, avant allocation : 0,075 MJf/MJ d'EMHV Consommation en électricité, avant allocation : 0,02 MJe/MJ d'EMHV Si procédé de distillation pour séparer l'EMHV: rajouter entre 0,02 et 0,03 MJf/MJ de Gaz naturel Consommation de méthanol : 95 kg/tonne EMHV ; Utilisation de méthylate de sodium ;

5.3.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

Ne disposant pas d'inventaire ECOINVENT pour la fabrication de semences de tournesol, le choix a été fait d'utiliser un inventaire disponible jugé le plus proche. Le travail conduit lors de la mise à jour des facteurs d'émission de GES par les instituts techniques français (voir **[Instituts techniques français, 2009]**) donne une valeur d'émission de CO₂ pour les semences de tournesol comprise entre celle du blé dur et du maïs. Pour souci de prudence, l'inventaire « semence de maïs » a été utilisé.

Catégorie de semence ou de plant	Facteur d'émissions indirectes (kg éq. CO ₂ /kg)
Blé dur	0,577
Maïs	0,898
Colza (12% lignées et 88% hybrides)	1,381
Tournesol	0,773

Source : [Gestim, Instituts techniques français, 2009]

5.3.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir le schéma précédent de la filière EMHV de colza.

Notons qu'une étape de raffinage supplémentaire à lieu, la wintérisation, par rapport au colza.

5.4. FILIERE EMHV DE SOJA

5.4.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production du soja aux USA (1/3) et au Brésil (2/3) • extraction d'huile localement puis transport vers la France, où a lieu la transestérification • Raffinage chimique en catalyse homogène, séparation de l'ester et de la glycérine par lavage à l'eau
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Origine : ECOINVENT pour la phase culture et extraction d'huile, et données PROLEA pour l'estérification France • Estimation de validité : huile de soja importée en France depuis les USA et le Brésil, données agricoles 2003 - 2005
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • Voir schéma en fin de section

5.4.1.2 Détail des allocations

Tableau 51 – Allocations pour la filière soja

Filière SOJA			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Culture -> extraction huile	huile brute	allocation au prorata énergétique	36%
	tourteau		64%
Transport -> Semi-raffinage	huile neutre	allocation au prorata énergétique	97%
	huiles acides		3%
Estérification	biodiesel	allocation au prorata énergétique	94%
	glycérine		4%
	huiles acides		1%
Distribution	biodiesel		100%

5.4.1.3 Scénario prospectif

Tableau 52 – Scenarii prospectifs pour la filière soja

Scenarii prospectifs SOJA			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
progression du non labour	mécanisation	-10%	% sur 5 ans
baisse légère de l'usage des pesticides	atteinte de la moitié de l'objectif ECOPHYTO	-25%	% sur 5 ans
stabilité sur les rendements (grande variation + plan Ecophyto)	Données de rendements	0%	% sur 5 ans
amélioration génétique, pratiques :	baisse apports engrais N	0%	% sur 5 ans
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités

valeur Colza pour cogénération			
pas de gain en rendement huile			

5.4.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> • 25,7 quintaux de grains à 9%/ha • Environ 470 kg EMHV / ha
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> • 7 unités d'azote apportées / ha/ an (pas d'apports organiques) ; • 55 litre/ha/an de mécanisation ; • ventilation pris en compte
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation en gaz naturel, avant allocation : 0,06 MJf/MJ d'EMHV • Consommation en électricité, avant allocation : 0,015 MJe/MJ d'EMHV • Consommation de méthanol : 95 kg/tonne EMHV ; • Utilisation de méthylate de sodium ;
Transports (zones de production vers France)	<ul style="list-style-type: none"> • Brésil – France : 9 000 km par bateau et 600 km par pipeline • USA – France : 7 000 km par bateau et 1 700 km par train

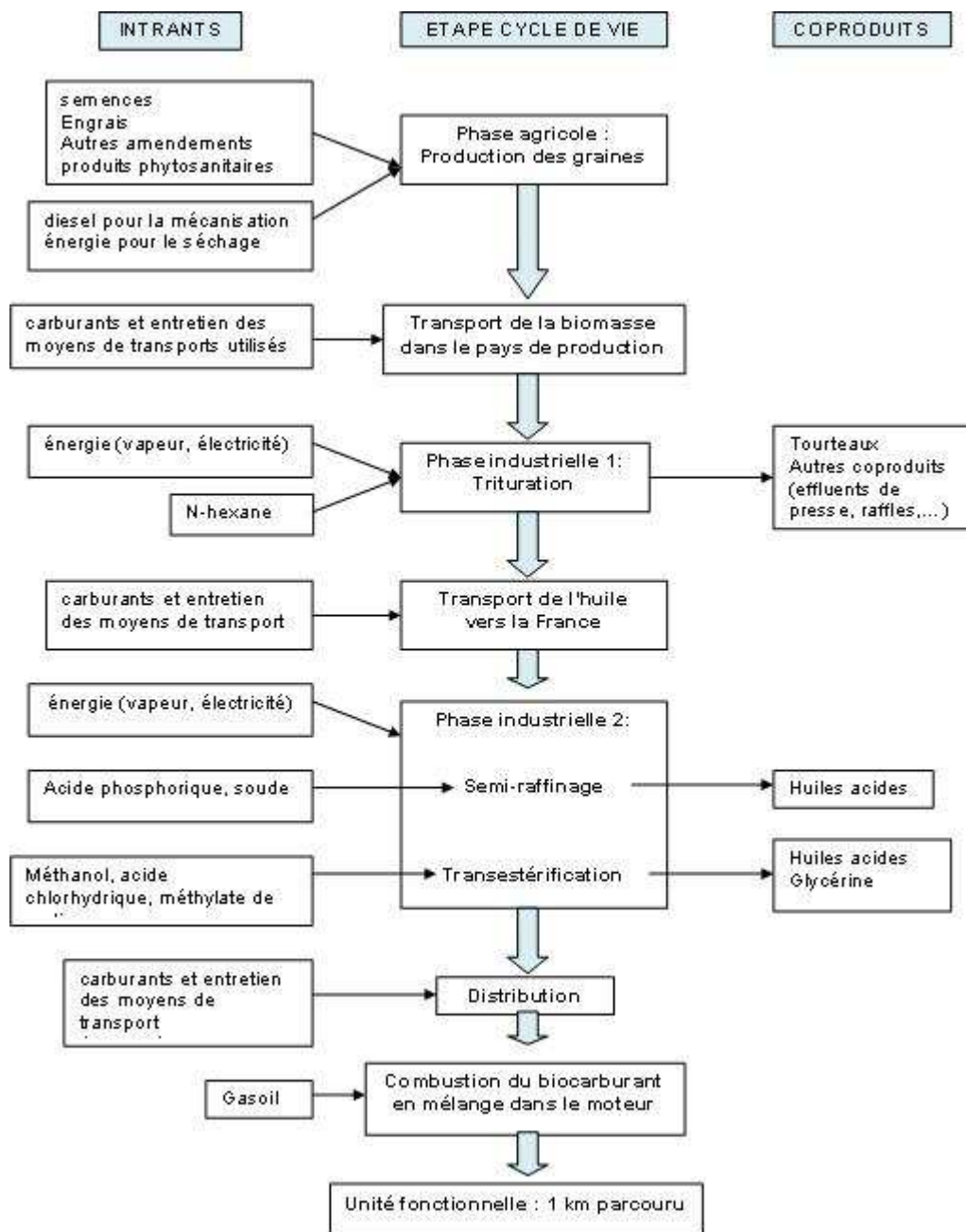
5.4.1.5 Éléments spécifiques de la modélisation

Le lessivage des nitrates a été estimé par BIO, avec une valeur de 10 unités d'azote par an.

5.4.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma ci-dessous.

Figure 11 - Présentation synthétique du périmètre retenu, EMHV de Soja



5.5. FILIERE EMHV DE PALME

5.5.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production de l'huile en Malaisie (60%) et en Indonésie (40%) • extraction d'huile localement puis transport vers la France, où a lieu la transestérification • Raffinage physique, séparation de l'ester et de la glycérine par lavage à l'eau
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Origine : ECOINVENT, HANSEN, et CIRAD pour la phase culture et extraction d'huile • données PROLEA et BIOCAR pour l'estérification France • Estimation de validité : huile d'origine Malaisie et Indonésie,
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • Voir schéma en fin de section

5.5.1.2 Détail des allocations

Tableau 53 – Allocations pour la filière palme

Filière PALME			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Culture -> extraction huile	huile brute	allocation au prorata énergétique	94,5%
	tourteau		5,5%
Semi-raffinage	huile neutre	allocation au prorata énergétique	96,5%
	huiles acides		3,5%
Estérification	biodiesel	allocation au prorata énergétique	95%
	glycérine		5%
	huiles acides		0%
Distribution	biodiesel		100%

5.5.1.3 Scénario prospectif

Tableau 54 – Scenarii prospectifs pour la filière palme

Scenarii prospectifs PALME			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
baisse émission CH ₄		-20%	% sur 5 ans
baisse des apports minéraux		-20%	% sur 5 ans
pas assez d'éléments pour modéliser les autres paramètres			
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités

5.5.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> • 212 quintaux de fruits/ ha • Environ 4 500 kg EMHV / ha
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> • 156 unités d'azote apportées/ha/an (pas d'apports organiques) ; • 48 litre/ha/an de mécanisation ; • Apports MgO et CaO pris en compte
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation en gaz naturel, avant allocation : 0,025 MJf/MJ • Consommation énergie par combustion biomasse (incluant cogénération d'électricité): 0,3 MJ/MJ d'EMHV (dont raffinage physique) • Consommation en électricité du réseau, avant allocation : 0,010 MJe/MJ d'EMHV • Consommation de méthanol : 95 kg/tonne EMHV ; • Utilisation de méthylate de sodium ;
Transports (zones de production vers France)	<ul style="list-style-type: none"> • Malaisie – France : 100 km par camion, puis 11 700 km par bateau. • Indonésie – France : 100 km par camion, puis 12 500 km par bateau

5.5.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

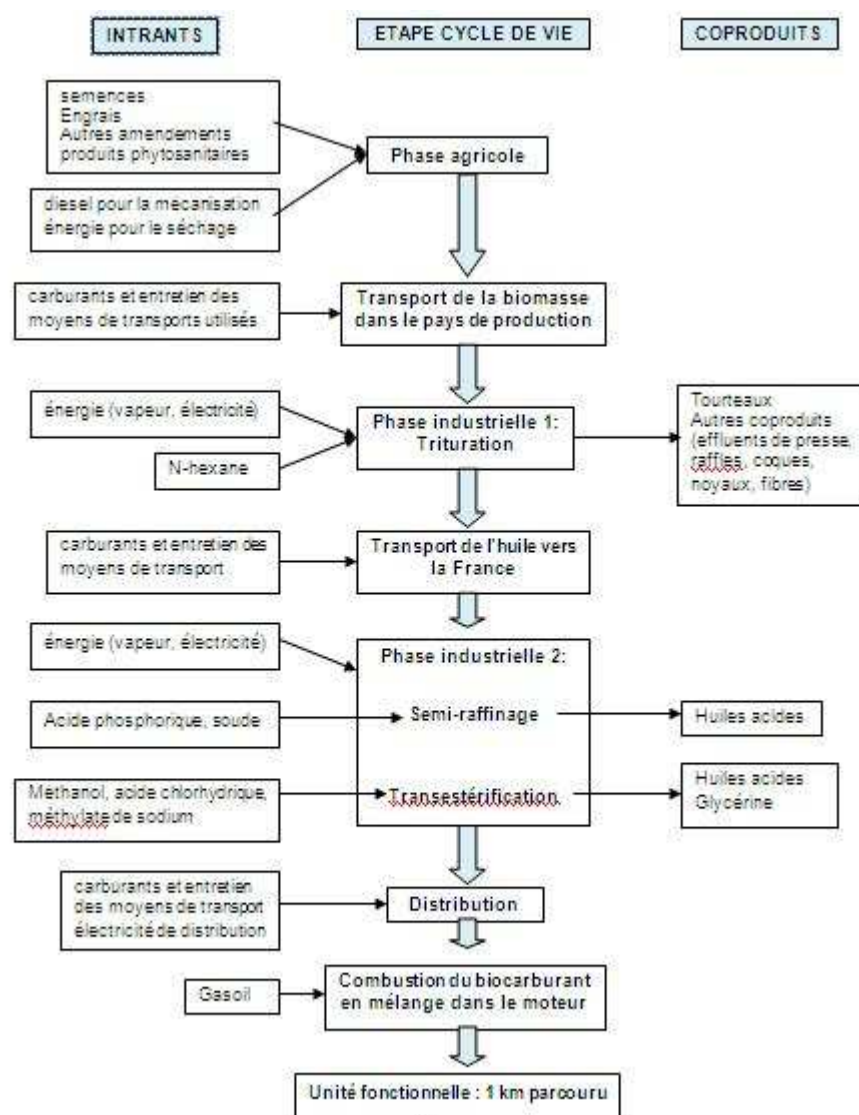
Compte tenu des apports annuels, le lessivage des nitrates a été estimé par BIO à 40 unités d'azote.

Un raffinage physique est nécessaire car cette huile possède une composition plus chargée en huiles acides. Ce raffinage a été estimé à 700 MJ de vapeur / t d'huile raffinée.

5.5.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma ci-dessous.

Figure 12 - Présentation synthétique du périmètre retenu, EMHV de palme



5.6. FILIERE HUILE VEGETALE PURE (HVP)

5.6.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production française, • extraction d'huile sur l'exploitation • presse à froid, • utilisation en incorporation à 100% sur véhicules avec kit d'adaptation
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Presse électrique de 7 à 10 kWhe, presse à la ferme • Bibliographie et échanges avec la FNCUMA
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • huile de ferme, production de taille moyenne et petite.

5.6.1.2 Détail des allocations

Tableau 55 – Allocations pour la filière HVP

Filière HVP			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Culture -> extraction huile	huile brute	allocation au prorata énergétique	46%
	tourteau		54%
utilisation	HVP		100%

5.6.1.3 Scénario prospectif

Tableau 56 – Scenarii prospectifs pour la filière HVP

Scenarii prospectifs HVP			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
Voir EMVH Colza			
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
passage sur des plus grosses presses en coopératives :			
presse plus grosse et plus efficace	gain en huile	+10%	% sur 5 ans
	baisse énergie moyenne	-20%	% sur 5 ans

5.6.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> • 32,8 quintaux de grains à 9% d'humidité /ha • Environ 1350 kg HVP / ha
------------	---

Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> • 188 unités d'azote apportées (engrais organique inclus) / ha/an ; • 68 litre/ha/an de mécanisation ; • apports de soufre et ventilation pris en compte
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> • consommation de 1 000 MJe/ t d'huile brute traitée, ce qui correspond à une presse de 8 kW pressant 100 kg de grains à l'heure. • pas d'autres dépenses énergétiques prises en compte, ni d'émissions de polluants • consommation sur place après filtration.

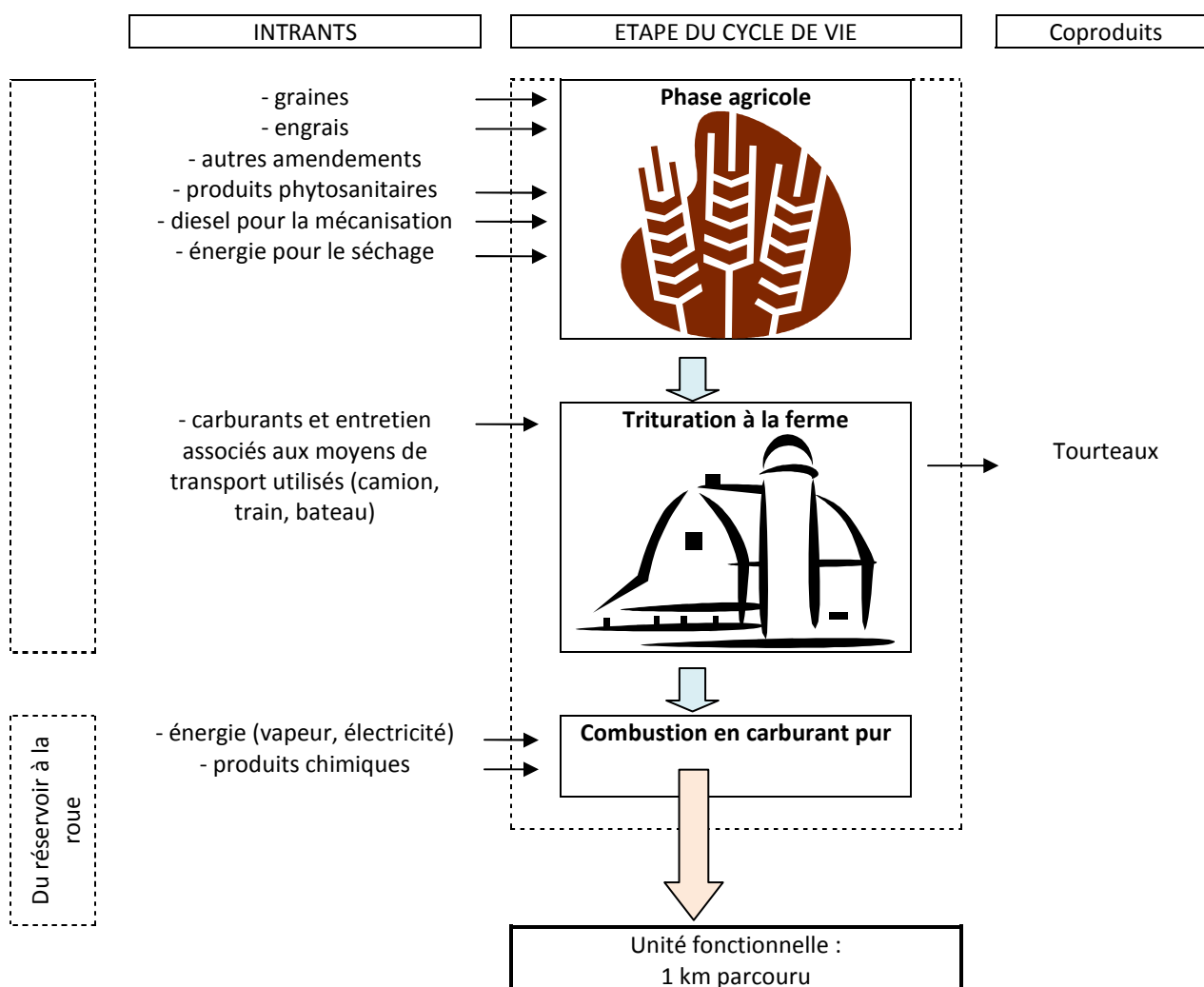
5.6.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

En terme de PCI du tourteau de colza fermier et donc d'allocation, il a été pris une valeur de 20,3 MJ PCI/kg de matière sèche. Cet écart de 3,1 MJ/kg par rapport aux tourteaux obtenus par la voie industrielle avec transestérification s'explique par la plus forte teneur en huile du tourteau fermier (entre 10 et 15% contre 1 ou 2% pour le tourteau industriel).

L'amélioration du rendement en huile dans le scénario prospectif, qui passe de 0,3 kg d'huile filtrée / kg de grain à 0,33 augmente la part de ce qui est affecté à l'huile, part qui évolue de 46% à 49%.

5.6.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Figure 13 – Description du cycle de vie des filières Huile Végétales Pures



5.7. FILIERE ESTER METHYLIQUE D'HUILES ALIMENTAIRES USAGEES (EMHAU)

5.7.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production en France, • Pré-estérification acide, puis transestérification basique - Séparation de l'ester par lavage à l'eau • Fonctionnement réel du site avec la chaleur issue de la récupération ou valorisation de l'énergie issue de l'incinération des déchets : cela a été modélisé dans une filière « actuelle France », la filière principale étant calculée à partir de gaz naturel
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • donnée VEOLIA • validité : 2007- 2009
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • voir schéma ci-dessous

5.7.1.2 Détail des allocations

Tableau 57 – Allocations pour la filière EMHAU

Filière EMHAU			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
collecte ->préparation	huile brute		100%
Estérification	biodiesel	allocation au prorata énergétique	93%
	glycérine		7%
	sels		0%
Distribution	biodiesel		100%

5.7.1.3 Scénario prospectif

Tableau 58 – Scenarii prospectifs pour la filière EMHAU

Scenarii prospectifs EMHAU
<p>Pour la filière EMHAU, il a été nécessaire de réaliser une approche spécifique. En effet, un seul site fonctionne actuellement en France et tire sa chaleur de la proximité d'un incinérateur de déchets. Cette énergie calorifique, peu transportable, a été considérée comme renouvelable et donc non prise en compte dans le bilan. Mais afin de fournir un bilan qui puisse être valable en général et comparable aux autres filières en termes de besoins énergétiques globaux, il a été fait le choix de modéliser :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'une part, la filière principale à partir de gaz naturel ; - d'autre part, une filière équivalente aux filières prospectives qui correspond ici en fait au cas actuel du site français en fonctionnement à partir d'énergie de type renouvelable.

5.7.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none">• Entre 700 et 800 kg EMHV / t huile brute collectée
Données de collecte	<ul style="list-style-type: none">• Entre 150 et 300 km en moyenne de transport par camion pour collecter l'huile
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none">• consommation de vapeur entre 800 et 1 100 MJf/ t EMHAU produit (0,02 et 0,03MJf / MJ d'EMHAU)• Utilisation de KOH comme base ;• Utilisation d'acides pour la pré-estérification

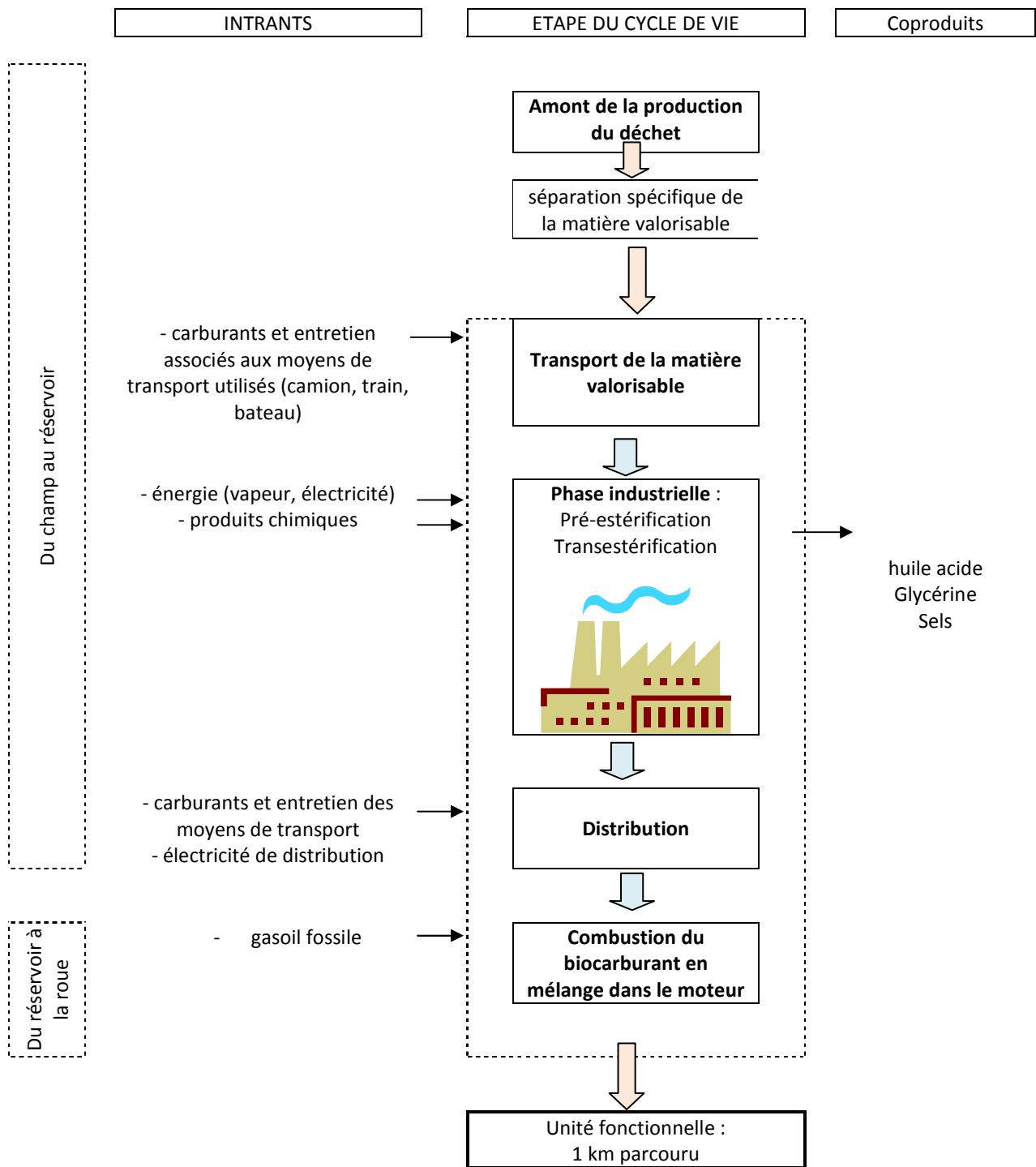
5.7.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

L'utilisation réelle de cet ester se fera par la suite dans des poids lourds. Il n'a pas été pris en compte de véhicule de type poids lourd dans cette étude (les niveaux des émissions ne faisant pas appel à des cycles normalisés et la technologie étant plus variable entre constructeurs). Afin de se focaliser sur les filières de production en elles-mêmes plus que sur les choix d'utilisation, données potentiellement plus changeantes, pour l'étape véhicule, cet ester a été considéré brûlé dans le même véhicule léger qu'utilisé pour les autres filières gazoles. De même, les éventuelles spécificités en termes de propriétés physico-chimiques (plus lourd, etc.) ne justifient pas de modification devant être intégrées dans ce travail compte tenu du niveau de précision auquel peut prétendre cette étude.

5.7.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma ci-dessous

Figure 14 – Description du cycle de vie des filières Esters de graisses animales et huiles alimentaires usagées



5.8. FILIERE ESTER METHYLIQUE DE GRAISSES ANIMALES (EMGA)

5.8.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production en France, • Pré-estérification acide, puis transestérification basique - Séparation de l'ester par distillation • La graisse animale est considérée comme un déchet, l'amont agricole et l'étape de préparation des sous-produits animaux à la graisse ne sont pas pris en compte dans le bilan de la filière principale (l'étape de préparation des graisses est donnée à titre indicatif, sur la base d'un inventaire ECOINVENT)
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • estimation BIO à partir d'échanges avec SARIA et des données VEOLIA et PROLEA • validité : 2008- 2010
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • voir schéma figurant dans le § 5.7

5.8.1.2 Détail des allocations

Tableau 59 – Allocations pour la filière EMGA

Filière EMGA			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
collecte ->préparation	huile brute		100%
Estérification	biodiesel	allocation au prorata énergétique	94%
	glycérine		6%
	sels		0%
Distribution	biodiesel		100%

5.8.1.3 Scénario prospectif

Tableau 60 – Scenarii prospectifs pour la filière EMGA

Scenarii prospectifs EMGA			
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
généralisation usage graisses comme combustible	réduction gaz naturel utilisé	-50%	% sur 5 ans
amélioration énergétique partie amont	réduction Energie utilisée	-30%	% sur 5 ans

5.8.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 900 et 970 kg EMGA / t de graisse collectée

Données de collecte	<ul style="list-style-type: none"> • 100 km en moyenne de transport par camion ont été estimés pour collecter la graisse une fois préparée, ce qui sera sûrement une valeur basse.
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> • consommation de gaz naturel entre 0,04 et 0,053 MJf/MJ d'EMGA produit • Utilisation de KOH comme base ; • Utilisation d'acides pour la pré-estérification

5.8.1.5 Éléments spécifiques de la modélisation

Il est important de rappeler ici qu'aucun site ne fonctionne encore actuellement en France, même si des projets sont en cours. La modélisation s'appuie donc à la fois sur les sites étrangers classiques et sur l'extrapolation de données d'autres filières lorsque nécessaire (chaleur pour la transestérification principalement).

La valeur importante utilisée pour le rendement résulte en partie de cette absence de données réelles. Par ailleurs, les procédés qui seraient mis en place permettraient de recycler au maximum les huiles acides, rapprochant ainsi des rendements des EMHV. De ce fait, les rendements restent relativement théoriques et optimistes.

Quelques kg de sulfate de potassium sont produits. Ils ont été traités en substitution, estimant que ces sels pouvaient être utilisés comme apports potassique en agriculture (substitué à un apport d'équivalent en K_2O).

5.8.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma des EMHAU, valable aussi pour cette filière. La matière valorisable est ici la graisse, après séparation des farines et de l'eau.

5.9. FILIERE ETHANOL DE BLE

5.9.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production en France • Dry mill, sans cogénération (données communiquées). • Une sous-filière avec cogénération est calculée par Bio à partir de ce jeu de données.
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Données agricoles : données fournies par ARVALIS, à partir de données SCEES et propres à l'institut • La valeur « France » utilisée est estimée à partir des 6 principales régions approvisionnant les sites de biocarburants. BIO a estimé leur part respective dans cet approvisionnement. • Données industrielles : TEREOS, site de Lillebonne
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • voir schéma en fin de section

5.9.1.2 Détail des allocations

Tableau 61 – Allocations pour la filière blé

Filière BLE				
Etape	Produit intermédiaire	matières sur lesquelles porte l'allocation		facteur d'allocation
	Coproduit			
Culture -> Saccharification	Moût faible	sucre utile	allocation au prorata énergétique	65%
		ms des drèches		35%
Fermentation	Vin	éthanol	allocation au prorata énergétique	60%
		ms des drèches		40%
Distillation -> Distribution	Ethanol			100%
séchage drèche	Ethanol			0%

5.9.1.3 Scénario prospectif

Tableau 62 – Scenarii prospectifs pour la filière blé

Scenarii prospectifs BLE			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	Unités
baisse légère de l'usage des pesticides	atteinte de la moitié de l'objectif ECOPHYTO	-10%	% sur 5 ans
très légère progression des rendements	Données de rendements	200	kg/ha/5ans
amélioration génétique, pratiques :	baisse apports engrais N	-5%	% sur 5 ans
CIPAN	réduction lessivage,	-50%	% sur 5 ans
CIPAN + légère progression du non labour	Deux effets opposés sur les charges de mécanisation : impact global estimé comme	0	% évolution

	nul		
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
cogénération biomasse	Substitution émissions fossiles gaz naturel	-46%	% sur 5 ans
cogénération biomasse	Substitution émissions électricité fossile	-31%	% sur 5 ans

5.9.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> 77,7 quintaux de grain à 15% d'humidité / ha Entre 2 200 et 2 400 kg éthanol / ha
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> Environ 186 unités d'azote apportées (pas d'apports organiques) ; 100 litre/ha de mécanisation ;
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> Entre 0,31 et 0,34 kg de drèches / kg de grains Consommation en gaz naturel, avant allocation : valeur entre 0,28 et 0,33 MJf/MJ d'éthanol Consommation en électricité du réseau, avant allocation : valeur entre 0,012 et 0,015 MJe/MJ d'éthanol

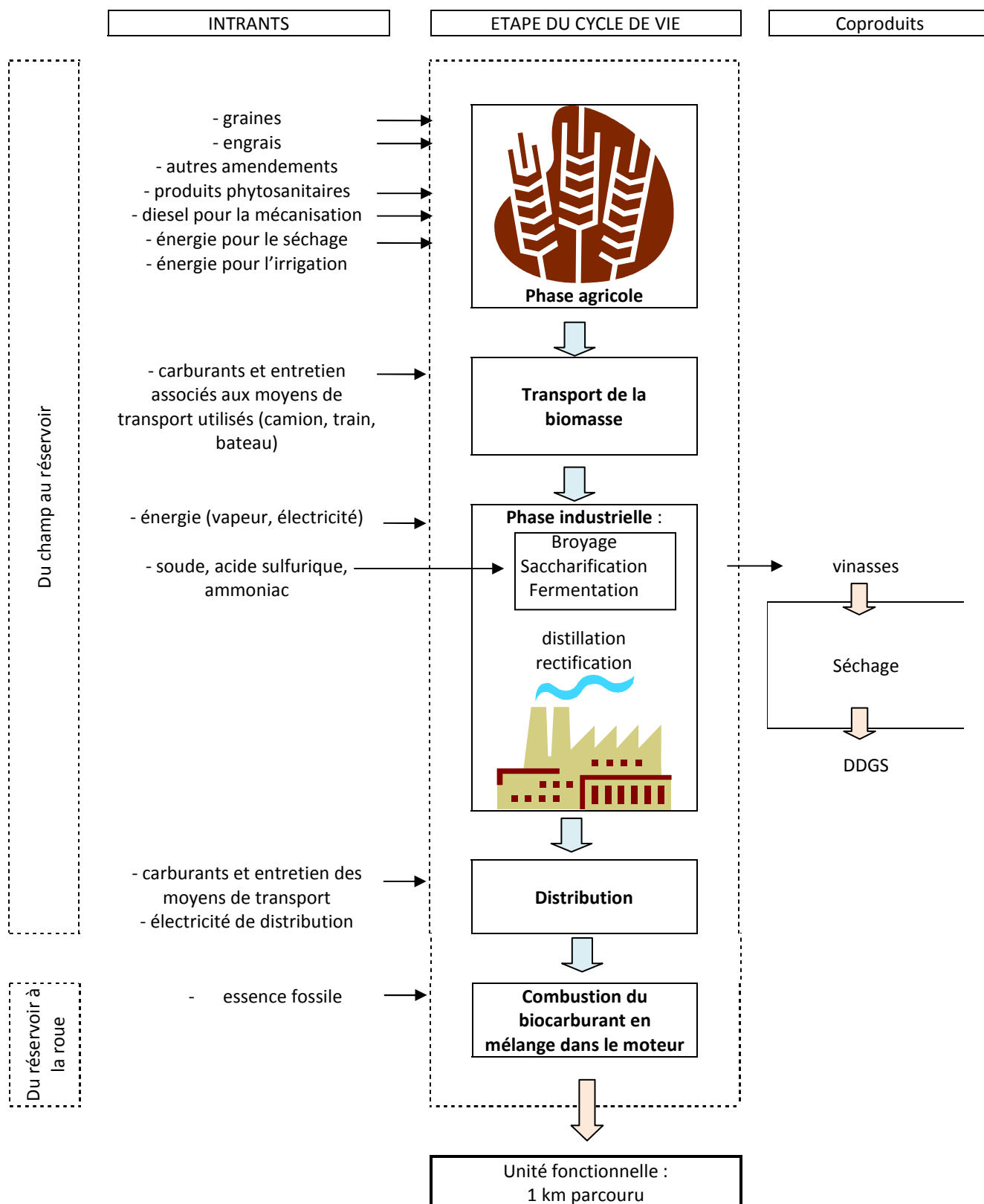
5.9.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

Le séchage des DDGS, même si en dehors du système, a été intégré dans le calcul « sans allocation » de la filière afin de fournir l'information au lecteur sur cette étape. Le choix de ne pas l'intégrer à l'éthanol résulte d'une lecture stricte de la norme ACV, pour laquelle la séparation des procédés est la voie à privilégier dès que possible dans la réflexion de l'attribution des charges environnementales. En d'autres termes, dès lors que les produits sont séparés, les systèmes peuvent l'être et chaque produit se voit attribuer ses charges environnementales propres, comme la dépense énergétique de séchage pour les vinasses. Mais en retenant l'argument que les vinasses ne sont pas encore un produit, il a été ainsi décidé d'intégrer cette charge dans la valeur sans allocation en guise d'information.

5.9.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir figure ci-dessous

Figure 15 – Description du cycle de vie de la filière éthanol de blé



5.10. FILIERE ETHANOL DE MAÏS

5.10.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production en France, • Dry mill, sans cogénération (un seul site en France achetant sa vapeur à l'extérieur).
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Données agricoles : données fournies par ARVALIS, à partir de données SCEES et propres à l'institut. • L'itinéraire de l'Aquitaine a été retenu pour modéliser la filière. • Données industrielles : données fournies par ABENGOA, pour son site de Lacq en France.
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • voir schéma en fin de section

5.10.1.2 Détail des allocations

Tableau 63 – Allocations pour la filière maïs

Filière MAIS				
Etape	Produit intermédiaire	matières sur lesquelles porte l'allocation		facteur d'allocation
	Coproduit			
Culture -> Saccharification	Moût faible	sucre utile	allocation au prorata énergétique	71%
	drèches	ms des drèches		29%
Fermentation	Vin	éthanol	allocation au prorata énergétique	66%
	drèches	ms des drèches		34%
Distillation -> Distribution	Ethanol			100%
séchage drèche	Ethanol			0%

5.10.1.3 Scénario prospectif

Tableau 64 – Scenarii prospectifs pour la filière maïs

Scenarii prospectifs MAIS			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
progression des rendements	augmentation, 1,1 qt/ha/an	550	kg/ha/5ans
baisse légère de l'usage des pesticides	atteinte de la moitié de l'objectif ECOPHYTO	-25%	% sur 5 ans
pas d'introduction de CIPAN		0	
amélioration génétique, pratiques :	baisse apports engrais N	-5%	% sur 5 ans
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
cogénération biomasse	Substitution émissions fossiles gaz naturel	-45%	% sur 5 ans
cogénération biomasse	Substitution émissions électricité fossile	-30%	% sur 5 ans

5.10.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none">• 88 quintaux de grain à 15% d'humidité / ha• Entre 3 000 et 3 400 kg éthanol / ha
Données de collecte	<ul style="list-style-type: none">• 233 unités d'azote apportées au total / ha/ an;• 90 litre/ha /an de mécanisation ;• Un séchage des grains permettant le passage de 25% d'humidité à 15% est intégré pour 0,35 MJ / kg de grain
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none">• Production entre 0,20 et 0,24 kg de drèches / kg de grain• Consommation en gaz naturel, avant allocation : valeur entre 0,23 et 0,28 MJf/MJ d'éthanol• Consommation en électricité du réseau, avant allocation : entre 0,020 et 0,028 MJe/MJ d'éthanol

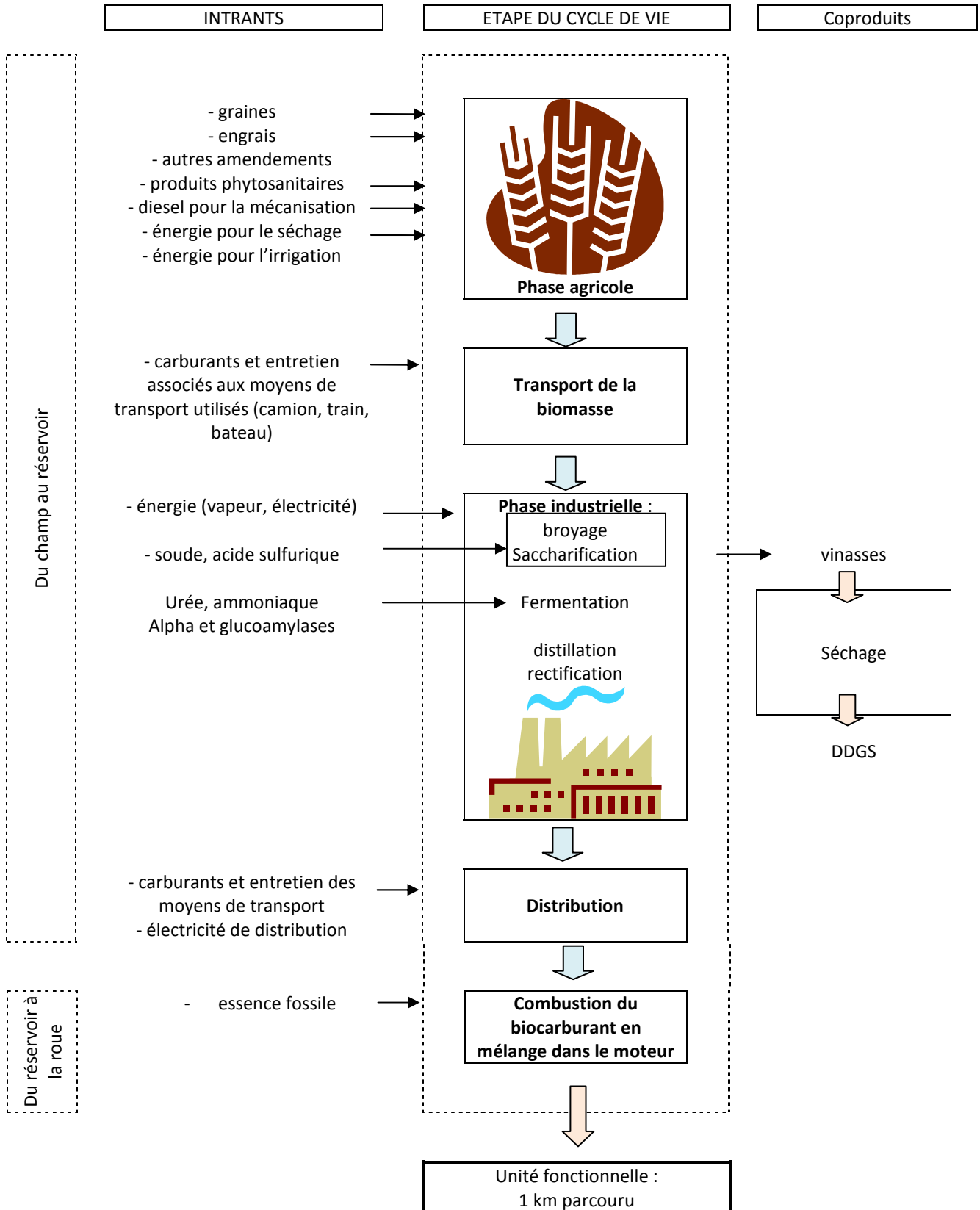
5.10.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

Tout comme pour le blé, le séchage des vinasses en drèches est intégré dans la valeur « sans allocation » de cette filière, mais entièrement exclue de la valeur « avec allocation ».

5.10.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma suivant.

Figure 16 – Description du cycle de vie de la filière éthanol de maïs



5.11. FILIERE ETHANOL DE BETTERAVE

5.11.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Production en France • Sucrerie et distillerie attenantes, avec cogénération • Calculs BIO pour une simulation sans cogénération.
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Les données agricoles proviennent de l'ITB. Compte tenu du bassin d'approvisionnement restreint des 3 sites majeurs (Origny, Arcis Sur Aube et Bazancourt), les itinéraires techniques issus des régions Picardie et Champagne rentrent chacun dans la valeur « France » utilisée, à hauteur de 50%. • Les données industrielles sont fournies par Cristal Union, pour son site d'Arcis sur Aube. Les données de la campagne 2007-2008 ont été utilisées.
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • voir schéma en fin de section

5.11.1.2 Détail des allocations

Tableau 65 – Allocations pour la filière betterave

Filière BETTERAVE			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Diffusion/Pressage	jus vert	allocation au prorata énergétique	80%
	pulpes		20%
Etapas postérieures à la Diffusion/Pressage	polarisable		100%

5.11.1.3 Scénario prospectif

Tableau 66 – Scenarii prospectifs pour la filière betterave

Scenarii prospectifs BETTERAVE			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	Unités
augmentation des rendements	augmente + 143 Kg sucre / ha / an	715	kg/ha/5ans
baisse légère de l'usage des pesticides	atteinte de la moitié de l'objectif ECOPHYTO	-25%	% sur 5 ans
généralisation des CIPAN	lessivage à 5 kgN/ha	5	kg/ha/5ans
généralisation des CIPAN	annule émission N ₂ O lié à ce lessivage	calcul automatique	
généralisation des CIPAN	augmente la charge de mécanisation	10%	% sur 5 ans

Scenarii prospectifs BETTERAVE			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	Unités
généralisation des CIPAN	plus de légumineuse dans les cipan, baisse des apports d'engrais minéraux	-10%	% sur 5 ans
généralisation des CIPAN	plus de lessivage P	0	
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
cogénération biomasse	Substitution émissions fossiles gaz naturel	-25%	% sur 5 ans
cogénération biomasse	Substitution émissions électricité fossile	0	% sur 5 ans

5.11.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> Rendement moyen entrée station d'environ 80 tonnes de betterave / ha (terre comprise), avec un taux moyen de 18% de sucre, auquel s'ajoute le sucre du colet (estimé à 1 200 kg/ha), soit 13 500 kg de sucre / ha Entre 6 200 et 6 800 kg d'éthanol. ha
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none"> Apports de 128 unités d'azote / ha/ an Une mécanisation pour 170 l/ha/an Un lessivage de l'azote réduit à 19 Unité d'azote/ha/an, grâce à un taux de couverture de CIPAN de 60% en moyenne Les amendements calciques sont pris en compte
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> Environ 0,18 kg de pulpes humides / kg de betterave Consommation en gaz naturel, avant allocation : valeur entre 0,30 et 0,35 MJf/MJ d'éthanol Consommation en électricité du réseau, avant allocation : entre 0,020 et 0,028 MJe/MJ d'éthanol

5.11.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

L'éthanol peut être produit à partir de trois intermédiaires issus d'étapes différentes du procédé et contenant des quantités différentes de sucre (appelé aussi *polarisable*) :

- le *jus vert* ou *jus de diffusion*, premier produit obtenu après extraction du sucre des betteraves,
- le *sirop*, produit à haute teneur en sucre obtenu en concentrant et purifiant le jus vert, le seul produit à pouvoir être conservé suffisamment longtemps pour produire en période d'inter campagne sucrière,
- et *l'égout pauvre 2* (EP2), reste de la phase de cristallisation lors de la production du sucre, et dont le sucre est valorisé en éthanol.

Le tableau suivant récapitule les données utilisées concernant ces produits.

Tableau 67 – détail des caractéristiques des trois sources d'éthanol betteravier

	Contenu en sucre (en % massique)	Part indicative utilisée sur une campagne
jus vert	15%	Entre 25 et 40%
sirop	64%	Entre 25 et 40%
EP2	60%	Entre 25 et 40%

L'existence d'une sucrerie étroitement imbriquée dans l'éthanolerie a nécessité d'éclaircir un point important. Comment doit-on prendre en compte les dépenses d'énergie sous forme de vapeur ? En effet, les industriels, en optimisant leur site, réutilisent constamment l'énergie d'une étape à l'autre. Connaître la consommation exacte d'une étape devient difficile, l'énergie qui lui est apportée étant réutilisée par ailleurs sous diverses formes (vapeur, eau chaude, air chaud,...). Cette étude n'ayant pas les moyens de réaliser des bilans thermodynamiques complets, il a été appliqué le principe suivant :

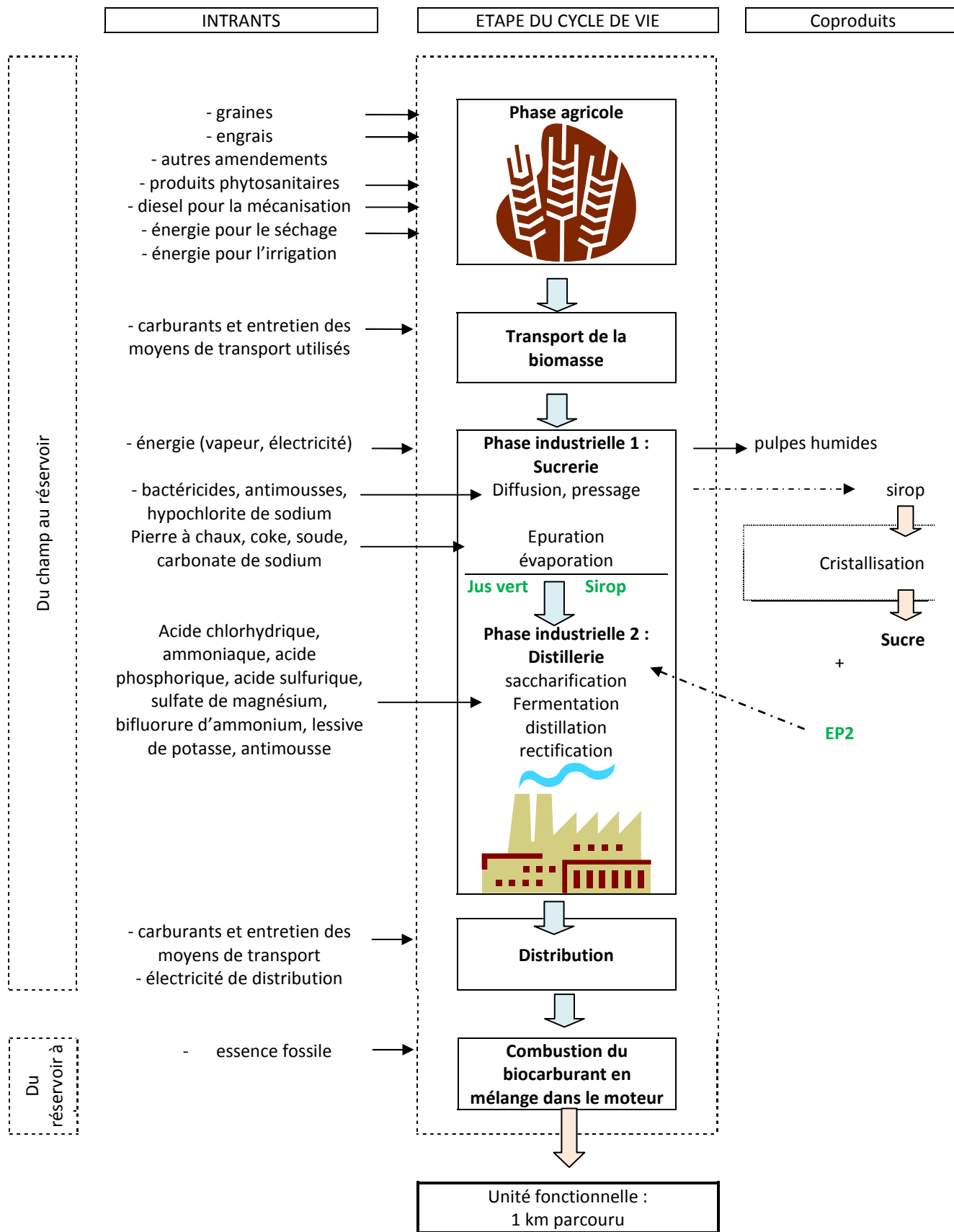
Est attribué à une étape le différentiel d'énergie entre l'énergie « vive » qui lui est envoyée et l'énergie « vive » qui peut être réutilisée par suite de la réalisation des fonctions de cette étape. On entend par énergie « vive » l'énergie contenue dans de la vapeur.

Ceci explique pourquoi une étape comme la concentration du jus vert en sirop ne se voit attribuer qu'une énergie faible alors qu'elle en demande effectivement une quantité importante. La grande majorité des vapeurs de concentration sont suffisamment énergétiques pour être utilisées à d'autres étapes.

5.11.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma ci-dessous.

Figure 17 – Description du cycle de vie de la filière éthanol de betterave



5.12. FILIERE ETHANOL DE CANNE A SUCRE

5.12.1.1 Rappels sur la modélisation de la filière

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> Sucrerie et distillerie attenantes culture et production Brésil
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> Bibliographie (MACEDO, données du « Copersugar technology Center»), région Centre-Sud Estimé par cet auteur comme représentatif du Brésil car cette région produit environ 90% de l'éthanol brésilien. 2005-2008 et scénario prospectif 2015 adapté d'estimation pour 2020
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> voir schéma en fin de section

5.12.1.2 Détail des allocations

Tableau 68 – Allocations pour la filière canne à sucre

Filière CANNE A SUCRE			
Etape	Produit intermédiaire	Mode d'allocation	facteur d'allocation
	Coproduit		
Culture -> utilisation	éthanol		100%
	bagasse	Traitée par substitution	

5.12.1.3 Scénario prospectif

Tableau 69 – Scenarii prospectifs pour la filière canne à sucre

Scenarii prospectifs CANNE A SUCRE			
Partie AGRICOLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	unités
amélioration rendement / ha		de 87 à 95	T canne/ha/an
Modifications apports de N	Moins d'apports minéraux plus d'apports organiques	de 60 à 30 de 0 à 27	Kg N / ha
augmentation du sucrose de la plante,	rendement éthanol / canne augmente	de 14,2 à 15,25	% sucrose
mécanisation à 100% de la récolte	augmentation charge mécanisation	de 160 à 350	l/ha
plus de brûlis	plus d'émissions de brûlis	Mise à 0 des émissions	
Partie INDUSTRIELLE			
Evolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage	Unités
chaudières haute pression	production d'électricité	3 600	MJe/t éthanol

5.12.1.4 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none">• 87 tonnes de canne / ha / an• Taux de sucre de 14,5%• Avec 0,07 kg d'éthanol par kg de canne, on obtient un rendement de 6 100 kg d'éthanol /ha/an
Données agricoles	<ul style="list-style-type: none">• Apports de 60 kg de N/ha/an• 160 litres/ha/an pour la mécanisation• Apports importants de CaO• 80% des surfaces font l'objet de brûlis, pour environ 12 t de matière sèche/ha/an. Les émissions considérées sont le CO₂ biogénique, le N₂O, le CH₄, le CO, et les particules. Ces brûlis sont estimés s'arrêter d'ici quelques années.
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none">• 0,28 kg de bagasse par kg de canne• Consommation d'énergie renouvelable à partir de la combustion de la bagasse, couvrant entièrement les besoins de chaleur et d'électricité (environ 0,37 MJ de PCI biomasse/MJ d'éthanol).• Un faible surplus d'électricité est intégré dans les données actuelles (470 MJe/t d'éthanol). Il augmentera dans le scénario prospectif.
Données de transport	<ul style="list-style-type: none">• 200 km en camion pour rejoindre le port, puis 10 080 km par tanker vers la France.

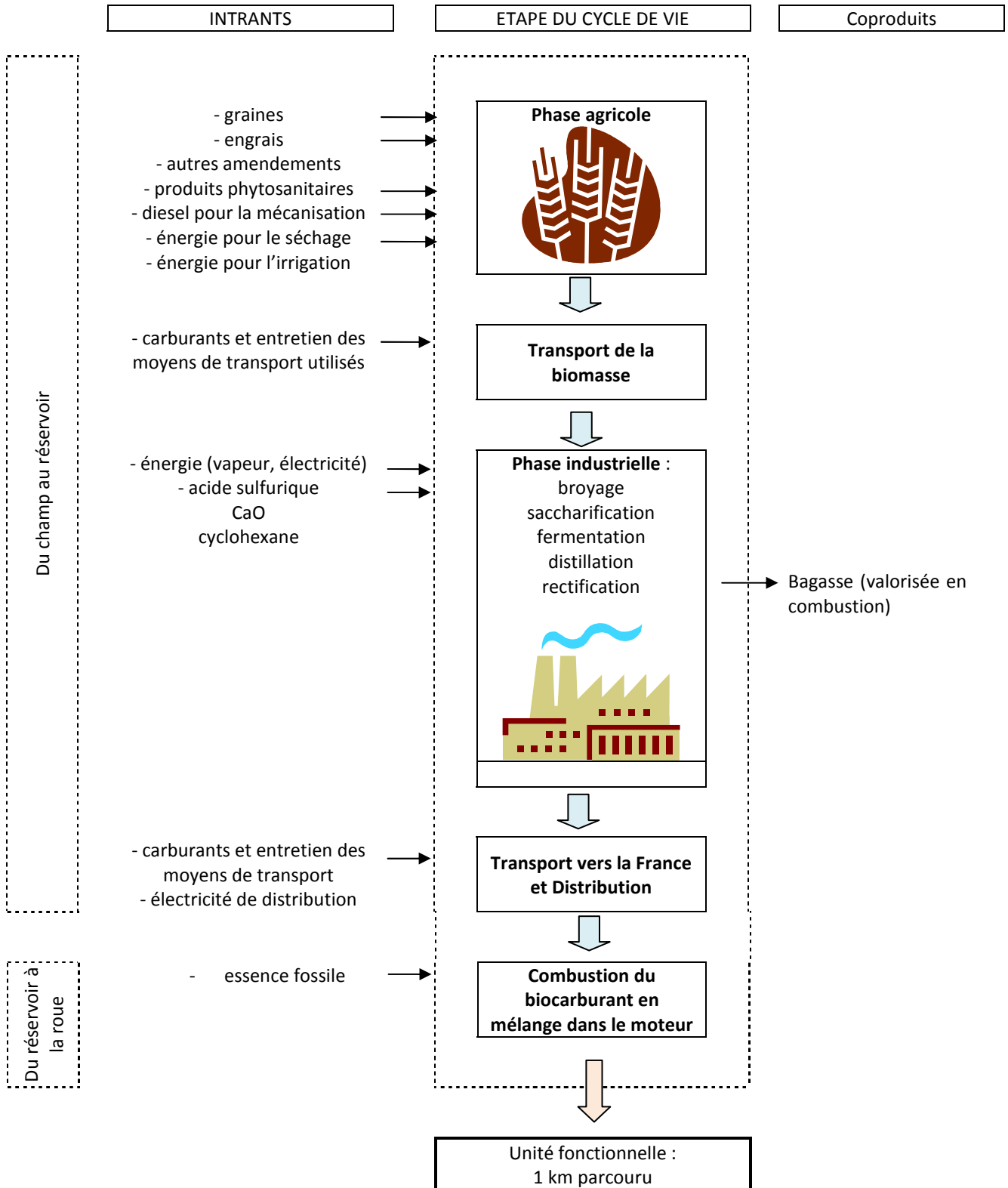
5.12.1.5 Eléments spécifiques de la modélisation

Le lessivage des nitrates a été estimé par BIO à partir des apports d'azote. Le même taux de volatilisation de l'ammoniaque que ceux calculés en France a été utilisé.

5.12.1.6 Schéma et périmètre de la filière

Voir schéma ci-dessous.

Figure 18 – Description du cycle de vie de la filière éthanol de canne à sucre



5.13. ÉTAPE DE FABRICATION DE L'ETBE

5.13.1.1 Rappels sur la modélisation de cette étape

Filière principale considérée	<ul style="list-style-type: none"> • Deux voies de fabrication ont été modélisées : • Une voie à partir d'isobutène issu du raffinage (sites de TOTAL ELF FINA) pour un quart de la production • Une voie en tant que valorisation d'un coproduit de la fabrication d'oxyde de propylène (site de LYONDELL BASELL), représentant les ¾ du marché
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Données fournies par les opérateurs des sites (LYONDELL BASELL et TOTAL) pour les données afférentes au procédé (consommations d'énergie, rendements,...) • Données du registre des polluants iREP pour les émissions de polluants
Périmètre, schéma du processus	<ul style="list-style-type: none"> • Voir schéma figure page suivante

5.13.1.2 Scénario prospectif

Tableau 70 – Scenarii prospectifs pour l'étape ETBE

ETBE LYONDELL		
Partie INDUSTRIELLE : évolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage
optimisation énergie sur l'une des étapes	baisse des quantités de combustible fossile brûlé	-10%
optimisation énergie sur l'une des étapes	baisse des quantités de combustible fossile brûlé	-20%
ETBE TOTAL		
Partie INDUSTRIELLE : évolutions prévisibles	impacts sur la modélisation	chiffrage
optimisation énergie	baisse énergie utilisée pour l'étape de production de l'ETBE	-5%

5.13.1.3 Quelques données de référence

Rendements	<ul style="list-style-type: none"> • 470 kg d'éthanol + 530 kg d'isobutène donne 1 tonne d'ETBE • Il n'a pas été considéré de perte au niveau de la réaction, les réactifs non réagis étant mobilisés à diverses fins.
Données industrielles	<ul style="list-style-type: none"> • Les consommations d'énergie « chaleur » des deux voies se situent entre 2000 à 3000 MJf/t ETBE • Les consommations électriques sont comprises entre 200 et 500 MJe/t ETBE

Données de transport	<ul style="list-style-type: none">• Les données particulières d'acheminement amont et aval au site de Fos sur Mer de LYONDELL BASELL ont été prises en compte. Leur principale différence consiste à ne pas utiliser la voie routière pour s'approvisionner.• Les données moyennes de transport aval de l'éthanol ont été utilisées pour l'ETBE produit sur les sites de raffinage de TOTAL.
----------------------	---

5.13.1.4 Éléments spécifiques de la modélisation

Voir partie dédiée dans le chapitre 4.

6. PRESENTATION DES RESULTATS

A partir de ces choix méthodologiques et des données collectées, un tableur Excel a été paramétré pour calculer les bilans du « champ à la roue » des filières étudiées. Dans le présent chapitre, la présentation des résultats pour les biocarburants dans le § 6.3 prend la forme de fiches de synthèse bâties sur une trame commune, présentant sous forme de tableaux et de graphiques les résultats principaux. Quelques éléments de commentaires spécifiques y sont intégrés. Le chapitre suivant fournira une analyse transversale plus approfondie de ces résultats. Ces fiches mentionnent :

- ▶ Les résultats de la filière principale sur les 5 indicateurs par rapport à la filière fossile de référence

- ▶ Les résultats des différentes sous filières et simulations réalisées sur l'énergie et les GES

- ▶ Un détail du poids de chaque étape sur les cinq indicateurs pour la filière principale

- ▶ Une mise en perspective de ces résultats avec des valeurs comparatives pour l'indicateur GES

Le cadre ci-dessous donne quelques détails supplémentaires pour la bonne compréhension du § 6.3 de ce chapitre.

Tableau 71 - Eléments de compréhension de la présentation des résultats

Filière principale : La filière principale a été choisie en tant que représentant dominant des procédés de production. La majorité des résultats sont donnés par rapport à cette dernière afin de ne pas alourdir la présentation. Ces résultats, lorsque non mentionnés, sont pris après allocation aux coproduits et application des crédits de substitution. Cette filière apparaît en rouge dans les figures lorsque présentée avec d'autres résultats.

Autres Sous filières : certains procédés ont été aussi quantifiés pour un procédé technologique ou une origine des intrants agricoles différents. Les valeurs des sous filières sont données en bleu dans ces figures et dans un tableau de mise en perspective de ces résultats pour les indicateurs consommation d'énergie non renouvelable et émission GES. Une sous filière spécifique considérée est le calcul des éléments prospectifs à partir de la filière principale évoquée ci-dessus et des éléments prospectifs décrits dans la partie méthodologie.

Unité utilisée : Les résultats sont présentés dans une unité légèrement différente de l'unité fonctionnelle définie initialement puisqu'ils sont donnés par MJ de biocarburant. Les modalités de passage de l'unité fonctionnelle prise sur carburant réel aux résultats par MJ de biocarburant seul ont été explicitées précédemment dans le paragraphe sur l'unité fonctionnelle.

Carburant utilisé : les résultats sont présentés pour l'E10 et le B10 respectivement, car ces niveaux de mélange seront les principaux des prochaines années. Une analyse des changements qu'apporte le fait de passer sur des niveaux d'incorporation plus élevés est proposée dans le chapitre 8.

Mise en perspective de ces résultats : en vue de rappeler le fait que les résultats des évaluations environnementales sont conditionnés par des hypothèses de calcul, d'autres résultats de l'évaluation sont aussi présentés :

- **Résultats « sans allocation » :** résultats avant allocation d'une partie des impacts des intrants et sortants du système étudié aux coproduits (si toutes les dépenses étaient à attribuer au seul biocarburant) : il convient de noter que ce calcul intègre le séchage des drèches ou tourteaux. Seule la pulpe surpressée a été considérée dans le périmètre éventuel de l'éthanol de betterave, sa transformation en pulpe déshydratée relevant d'une amélioration de produit n'étant pas intégrée.
- **résultats « sans crédit » :** résultats sans comptabiliser de crédits de substitution le cas échéant (exemple : l'épandage des eaux terreuses en betterave donne lieu à la substitution d'apports minéraux en quantités nutritionnelles équivalente).
- **Résultats N₂O :** simulations faites sur la base d'hypothèses différentes en ce qui concerne la prise en compte de l'azote et des émissions N₂O (simulations « N₂O type GIEC » ou « type JEC ». Voir le tableau 19 pour le détail des hypothèses de ce calcul)
- **Valeurs « autres études » :** les résultats calculés pour deux études majeures sur le sujet (JEC 2008) et ADEME-DIREM 2002 figurent aussi dans ce tableau de mise en perspective.

Point d'attention : le terme « cogénération » employé seul dans ces tableaux désigne les cogénérations aujourd'hui en place à partir de gaz naturel. Pour parler des projets futurs visant à utiliser de la biomasse en tant que source d'énergie, le présent rapport utilise explicitement les termes « cogénération biomasse ». Ces projets sont intégrés dans le calcul pour la filière prospective.

Présentation des gains pour les indicateurs Eutrophisation, Toxicité Humaine, Photo oxydation : plus que des pourcentages d'évolution, qui ne sont pas indiqués pour des indicateurs avec ces marges d'incertitudes sur les impacts potentiels, il a été préféré la mention d'amélioration (« + ») ou détérioration (« - ») probables, l'intensité probable de l'évolution étant marqué par le nombre de + ou de - attribués. Si les écarts ne sont pas significatifs, il a été utilisé un « = ».

6.1. FILIERES FOSSILES DE REFERENCES

FILIERES FOSSILES DE REFERENCE	
Procédés modélisés	Essence et pétrole raffinés dans une raffinerie moyenne française
Origine des données	Bibliographie : ECOINVENT pour le pétrole brut, l'étude JEC pour l'énergie raffinerie et les émissions CO ₂ du raffinage, iREP pour les émissions d'autres polluants, IFP pour les données transports et émissions véhicules
Validité des données	France 2005 – 2010

6.1.1. RESULTATS GENERAUX

Tableau 72 – Indicateurs par MJ de carburant fossile

	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Essence (E0)	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Diesel (B0)	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05

6.1.2. RESULTATS PROSPECTIFS

Les deux tableaux suivants illustrent les améliorations prévues entre les carburants fossiles actuels, répondant à la norme EURO4, et les carburants fossiles qui seraient disponibles autour de 2013 et qui répondraient à la norme EURO5. Ces calculs retranscrivent les hypothèses faites sur ces carburants, à savoir des gains de consommation (d'où des tableaux données « par km parcouru ») et la poursuite de la réduction des émissions polluantes.

Tableau 73 – Indicateurs par km parcouru par le diesel Euro 4 et Euro 5

Diesel	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / km	kg éq. de CO ₂ / km	kg éq. de C ₂ H ₄ / km	kg éq. de 1,4-DB / km	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / km
Euro 4	2,12	1,55E-01	1,91E-05	7,01E-01	6,30E-05
Euro 5	1,78	1,30E-01	1,60E-05	5,88E-01	4,90E-05
Gain	16%	16%	16%	16%	22%

Tableau 74 – Indicateurs par km parcouru par l'essence Euro 4 et Euro 5

Essence	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / km	kg éq. de CO ₂ / km	kg éq. de C ₂ H ₄ / km	kg éq. de 1,4-DB / km	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / km

Euro 4	2,69	1,98E-01	4,40E-05	4,51E-02	3,97E-05
Euro 5	2,12	1,56E-01	3,46E-05	3,55E-02	3,12E-05
Gain	21%	21%	21%	21%	21%

6.1.3. MISE EN PERSPECTIVE A TRAVERS LES VALEURS DE DEUX AUTRES ETUDES

Afin de situer les résultats de cette étude pour les filières fossiles de référence, nous proposons ci-dessous la mise en perspective à travers les valeurs utilisées dans deux autres études antérieures.

Tableau 75- Tableau comparatif de différentes études pour un MJ de diesel, consommation d'énergie non renouvelable

MJf / MJ	TOTAL	extraction	raffinage ¹¹	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
Diesel, étude BIO IS 2009	1,25	1,12E-01	1,14E-01	2,12E-02	1
données JEC	1,16	3E-02	1E-01	3E-02	1
données ADEME/DIREM	1,09	8E-02		1,04E-02	1

Tableau 76 - Tableau comparatif de différentes études pour un MJ de diesel, émission GES

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	extraction	raffinage	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
Diesel, étude BIO IS 2009	9,14E-02	7,63E-03	9,67E-03	5,23E-04	7,35E-02
données JEC	8,77E-02				
données ADEME/DIREM	7,93E-02	2,58E-03	3,18E-03	7,20E-04	7,28E-02

Tableau 77 – Tableau comparatif de différentes études pour un MJ d'essence, consommation d'énergie non renouvelable

MJf / MJ	TOTAL	extraction	raffinage	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
Essence, étude BIO IS 2009	1,22	1,12E-01	9,10E-02	2,12E-02	1
données JEC	1,14	3E-02	8E-02	3E-02	1
données ADEME/DIREM	1,15	1,40E-01		1,06E-02	1

Tableau 78 – Tableau comparatif de différentes études pour un MJ d'essence, émission GES

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	extraction	raffinage	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
--------------------------------	-------	------------	-----------	------------------------	----------

¹¹ Cette donnée intègre les consommations et émissions indirectes liées à la mise à disposition de l'énergie consommée sur le site. Cette partie est intégrée dans l'étape extraction dans l'étude du JEC.

Essence, étude BIO IS 2009	9,01E-02	7,63E-03	7,34E-03	5,22E-04	7,46E-02
données JEC	8,70E-02				
données ADEME/DIREM	8,59E-02	2,71E-03	7,01E-03	9,15E-04	7,53E-02

Les tableaux ci-dessus illustrent les écarts avec les deux études choisies. **Les valeurs d'émission de GES et de consommation d'énergie fossile sont plus élevées dans l'étude présente que dans les deux études comparatives.**

L'écart est le plus marqué sur la consommation d'énergie. Cet écart provient de valeurs assez élevées des inventaires du pétrole brut et de l'étape de raffinage dans une moindre mesure. Les inventaires d'ECOINVENT intègrent en effet un nombre plus important d'intrants et de paramètres que ne l'a fait l'étude JEC par exemple. Notamment, les infrastructures sont prises en compte dans ECOINVENT et sont ici intégrées. Mais le tableau ci-dessous illustre que ce facteur reste modéré dans le résultat global. Une analyse plus poussée de l'étape d'extraction laisse penser qu'une part des écarts proviendrait aussi de l'utilisation d'inventaires ECOINVENT d'approvisionnement en pétrole brut préagregés sur la base d'approvisionnement suisse, et non français (inventaire Moyen-Orient et Afrique notamment). Cet élément, estimé pouvoir jouer sur un ou deux grammes de CO₂ au niveau de l'inventaire final de ces filières, n'est cependant pas remis en cause comme élément bloquant par les membres du CT.

Tableau 79 – Analyse du poids des infrastructures d'extraction dans le résultat de la filière essence fossile.

Essence EURO4,	Résultat global, avec l'inventaire du pétrole brut intégrant les infrastructures	Résultat global, sans les infrastructures dans l'inventaire du pétrole brut	écart
EnF	1,22	1,20	-2%
GES	9,01E-02	8,82E-02	-2%

Les niveaux d'émission de CO₂ par MJ suivent et sont plus élevés par rapport aux autres références, et ce notamment pour le diesel. Les effets du passage aux normes EURO5 n'entraînent que peu d'écarts par MJ, le fait le plus notoire étant la baisse de la consommation et donc d'émissions par kilomètre parcouru.

6.2. RESULTATS GLOBAUX PAR KM PARCOURU

6.2.1. SUR CARBURANTS REELS

Les résultats par km parcouru pour les carburants réels (E0, E10, E85, B0, B10, B30) sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 80 – Résultats complets par km parcouru, ensemble des filières

		Energie primaire non renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
		MJf/km	kg eq CO ₂ /km	kg eq C ₂ H ₄ /km	kg eq 1,4-DB /km	kg eq PO ₄ ³⁻ /km
B0	B0, euro 4	2,12	1,55E-01	1,91E-05	7,01E-01	6,30E-05
E0	E0, euro 4	2,69	1,98E-01	4,40E-05	4,51E-02	3,97E-05
éthanol de betterave	E10 de betterave	2,60	1,89E-01	4,01E-05	4,70E-02	6,62E-05
	E85 de betterave	1,60	1,01E-01	5,46E-05	6,70E-02	3,46E-04
	ETBE d'E10 de betterave	2,66	1,93E-01	4,01E-05	4,66E-02	6,49E-05
éthanol de blé	E10 de blé	2,60	1,92E-01	4,01E-05	4,97E-02	9,88E-05
	E85 de blé	1,64	1,28E-01	5,45E-05	9,83E-02	7,22E-04
	ETBE d'E10 de blé	2,66	1,95E-01	4,00E-05	4,94E-02	9,79E-05
éthanol de maïs	E10 de maïs	2,60	1,91E-01	4,00E-05	4,82E-02	9,40E-05
	E85 de maïs	1,57	1,17E-01	5,40E-05	8,16E-02	6,67E-04
	ETBE d'E10 de maïs	2,65	1,94E-01	4,00E-05	4,79E-02	9,31E-05
éthanol de canne à sucre	E10 de canne à sucre	2,54	1,88E-01	6,21E-05	4,73E-02	6,99E-05
	E85 de canne à sucre	0,885	9,20E-02	3,08E-04	7,13E-02	3,88E-04
	ETBE d'E10 de canne à sucre	2,59	1,92E-01	6,23E-05	4,70E-02	6,86E-05
biodiesel de soja	B10 de soja	1,98	1,44E-01	1,92E-05	5,32E-01	8,55E-05
	B30 de soja	1,71	1,21E-01	1,98E-05	5,39E-01	1,29E-04
biodiesel de tournesol	B10 de tournesol	1,99	1,45E-01	1,97E-05	5,34E-01	1,19E-04
	B30 de tournesol	1,71	1,23E-01	2,11E-05	5,45E-01	2,31E-04
biodiesel de colza	B10 de colza	1,99	1,47E-01	1,97E-05	5,33E-01	1,15E-04
	B30 de colza	1,73	1,29E-01	2,12E-05	5,41E-01	2,19E-04
biodiesel de palme	B10 de palme	1,97	1,44E-01	1,86E-05	5,33E-01	8,62E-05
	B30 de palme	1,65	1,22E-01	1,78E-05	5,42E-01	1,32E-04
EMHAU	B10 de EMHAU	1,96	1,42E-01	1,81E-05	5,28E-01	6,51E-05
	B30 de EMHAU	1,63	1,15E-01	1,62E-05	5,27E-01	6,73E-05
EMGA	B10 de EMGA, sans préparation des graisses	1,96	1,42E-01	1,80E-05	5,28E-01	6,53E-05
	B30 de EMGA, sans préparation des graisses	1,63	1,15E-01	1,61E-05	5,27E-01	6,80E-05
HVP 100	HVP100	0,404	5,68E-02	1,02E-05	7,50E-01	6,17E-04

6.2.2. RESULTATS PAR KM PARCOURU, RAMENES AU SEUL BIOCARBURANT DU MELANGE

A partir de ces résultats, une étape de traitement décrite par le tableau 9 est appliquée. On passe ainsi à des résultats « par km parcouru par le biocarburant dans le mélange » conformément à l'équation et principes donnés en partie introductive. Ces valeurs sont intitulées « E10..., ramené au biocarburant » dans le tableau ci-dessous.

Tableau 81 - Résultats complets par km parcouru, ramenés à la partie biocarburant du mélange, ensemble des filières

		Energie primaire non renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
		MJf/km	kg eq CO ₂ /km	kg eq C ₂ H ₄ /km	kg eq 1,4-DB /km	kg eq PO ₄ ³⁻ /km
B0	B0, euro 4	2,12	1,55E-01	1,91E-05	7,01E-01	6,30E-05
E0	E0, euro 4	2,69	1,98E-01	4,40E-05	4,51E-02	3,97E-05
éthanol de betterave	E10 de betterave, ramené au biocarburant seul	1,30	6,69E-02	-1,32E-05	7,28E-02	4,28E-04
	E85 de betterave, ramené au biocarburant seul	1,30	7,48E-02	5,74E-05	7,28E-02	4,28E-04
	ETBE E10 de betterave, ramené à l'éthanol dans l'ETBE	2,15	1,16E-01	-1,34E-05	6,78E-02	4,09E-04
Ethanol de blé	E10 de blé, ramené au biocarburant seul	1,35	1,05E-01	-1,32E-05	1,13E-01	9,04E-04
	E85 de blé, ramené au biocarburant seul	1,36	1,10E-01	5,73E-05	1,12E-01	9,04E-04
	ETBE E10 de blé, ramené à l'éthanol dans l'ETBE	2,21	1,51E-01	-1,36E-05	1,08E-01	8,91E-04
éthanol de maïs	E10 de maïs, ramené au biocarburant	1,27	8,75E-02	-1,39E-05	9,14E-02	8,34E-04
	E85 de maïs, ramené au biocarburant	1,27	9,55E-02	5,67E-05	9,14E-02	8,34E-04
	ETBE E10 de blé, ramené à l'éthanol dans l'ETBE	2,11	1,37E-01	-1,41E-05	8,66E-02	8,20E-04
éthanol de canne à sucre	E10 de canne à sucre, ramené au biocarburant	0,402	5,57E-02	3,08E-04	7,83E-02	4,81E-04
	E85 de canne à sucre, ramené au biocarburant	0,402	6,36E-02	3,79E-04	7,83E-02	4,81E-04
	ETBE E10 de canne à sucre, ramené à l'éthanol dans l'ETBE	1,23	1,04E-01	3,12E-04	7,33E-02	4,63E-04
EMHV de soja	B10 de soja, ramené au biocarburant	0,657	3,59E-02	2,07E-05	-1,11E+00	3,04E-04
	B30 de soja, ramené au biocarburant	0,657	3,59E-02	2,16E-05	1,29E-01	2,97E-04
EMHV de Tournesol	B10 de tournesol, ramené au biocarburant	0,682	4,27E-02	2,52E-05	-1,09E+00	6,61E-04
	B30 de tournesol, ramené au	0,682	4,27E-02	2,61E-05	1,50E-01	6,54E-04

		Energie primaire non renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
		MJf/km	kg eq CO ₂ /km	kg eq C ₂ H ₄ /km	kg eq 1,4-DB /km	kg eq PO ₄ ³⁻ /km
	biocarburant					
EMHV de colza	B10 de colza, ramené au biocarburant	0,733	6,34E-02	2,55E-05	-1,10E+00	6,19E-04
	B30 de colza, ramené au biocarburant	0,733	6,34E-02	2,64E-05	1,39E-01	6,12E-04
EMHV de palme	B10 de palme, ramené au biocarburant	0,460	3,71E-02	1,35E-05	-1,10E+00	3,13E-04
	B30 de palme, ramené au biocarburant	0,460	3,71E-02	1,44E-05	1,41E-01	3,06E-04
EMHAU	B10 de EMHAU, ramené au biocarburant	0,402	1,48E-02	7,98E-06	-1,15E+00	8,51E-05
	B30 de EMHAU, ramené au biocarburant	0,402	1,48E-02	8,89E-06	8,77E-02	7,80E-05
EMGA	B10 de EMGA, sans préparation des graisses, ramené au biocarburant	0397	1,43E-02	7,76E-06	-1,15E+00	8,76E-05
	B30 de EMGA, sans préparation des graisses, ramené au biocarburant	0,397	1,43E-02	8,67E-06	8,75E-02	8,06E-05
HVP 100%	HVP100, ramené au biocarburant	0,404	5,68E-02	1,02E-05	7,50E-01	6,17E-04

Ces valeurs, afin de les rendre plus parlantes et comparables aux autres études, sont ensuite divisées par la consommation en MJ/km pour aboutir aux résultats détaillés « **par MJ de biocarburant** », présentés à la section suivante filière par filière.

6.3. RESULTATS DETAILLES PAR MJ DE CARBURANT

6.3.1. EMHV DE COLZA

Filière	EMHV de COLZA
Filière principale considérée	extraction d'huile locale, estérification France Raffinage chimique, Catalyse homogène, Lavage à l'eau
Origine des données	CETIOM pour la phase culture et extraction d'huile, et données PROLEA pour l'estérification France
Validité des données	France 2007 – 2010

6.3.1.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 82 – Comparaison des impacts environnementaux du biodiesel de colza et du diesel par MJ de carburant

Colza	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJf / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,431	3,73E-02	1,50E-05	-6,48E-01	3,64E-04
Réduction	65%	59%	-	+++	--

6.3.1.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 19 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

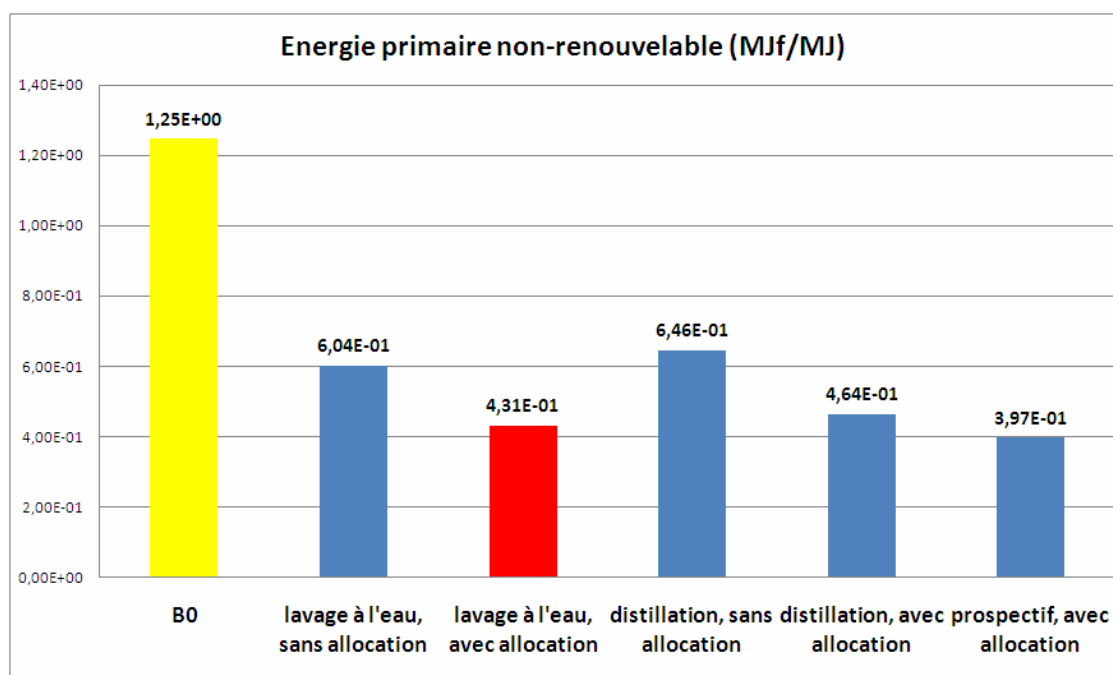
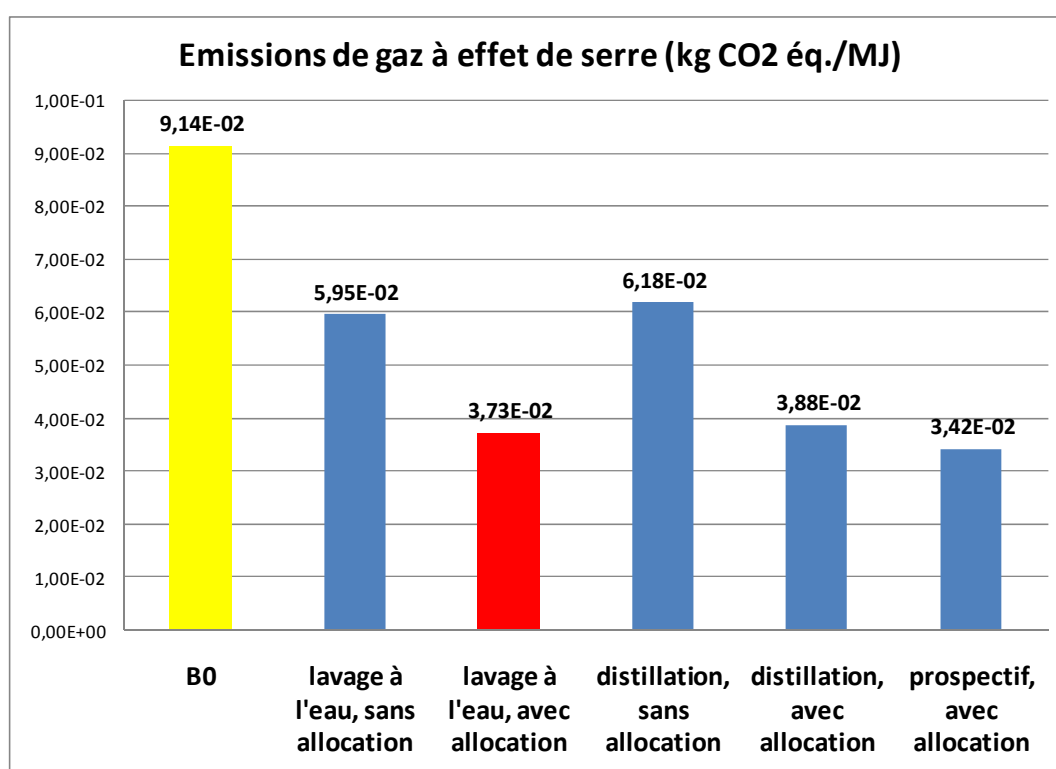


Figure 20 – Emissions de GES par MJ de biocarburant

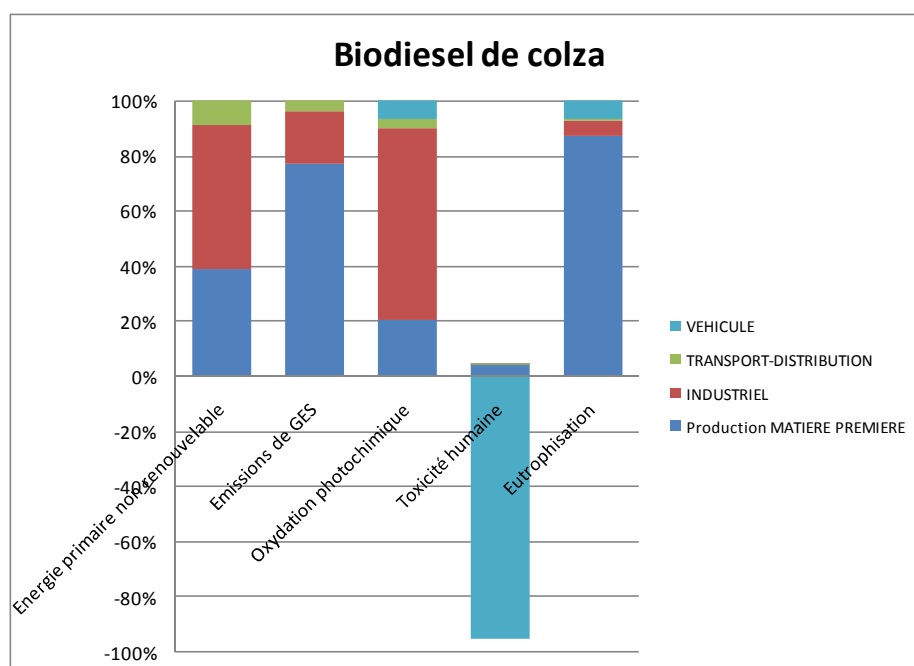


On peut noter que les écarts entre lavage à l'eau et distillation sont relativement modérés, l'impact sur la consommation d'énergie fossile ne faisant progresser cet indicateur que de 2,2%.

6.3.1.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 21 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



Pour un détail sur les postes contributeurs plus précis : voir partie analyse au chapitre 7

➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 83 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	3,73E-02	2,87E-02	7,10E-03	1,47E-03	0,00E+00 ¹²
filière principale N ₂ O valeur par défaut GIEC	4,02E-02	3,16E-02	7,10E-03	1,47E-03	0,00E+00
filière principale N ₂ O type JEC	3,62E-02	2,76E-02	7,10E-03	1,47E-03	0,00E+00
Résultats étude JEC	4,15E-02	4,94E-02	-9,42E-03	1,57E-03	0,00E+00
Résultats étude ADEME/DIREME	2,02E-02	1,43E-02	5,57E-03	3,30E-04	0,00E+00

Pour une analyse sur ce tableau, se reporter au chapitre 7.

¹² Ces émissions nulles viennent du fait que les biocarburants sont considérés neutres sur l'étape de combustion car émettant du CO₂ d'origine biogénique.

6.3.2. EMHV DE TOURNESOL

EMHV de TOURNESOL	
Filière principale considérée	Raffinage chimique, Catalyse homogène, Lavage à l'eau
Origine des données	CETIOM pour la phase culture et extraction d'huile, et données PROLEA pour l'estérification France
Validité des données	France 2007 – 2010

6.3.2.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 84 – Comparaison des impacts environnementaux du biodiesel de tournesol et du diesel par MJ de carburant

Tournesol	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJf / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,401	2,51E-02	1,48E-05	-6,41E-01	3,89E-04
Réduction	68%	73%	-	+++	--

6.3.2.2 Résultats des sous-filières et de la prospective

Figure 22 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

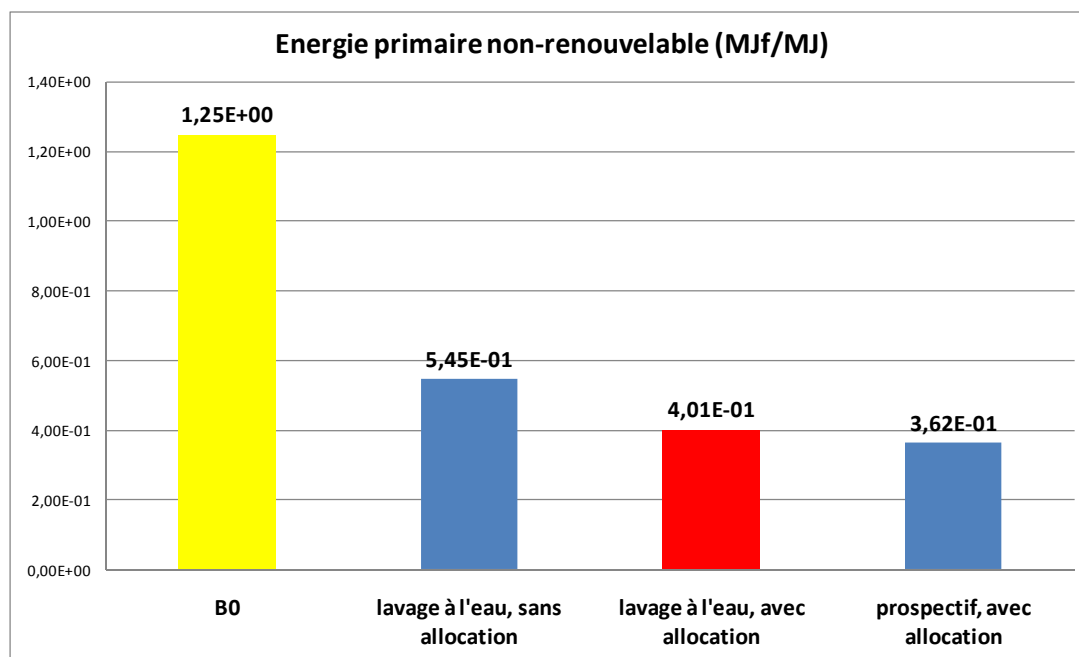
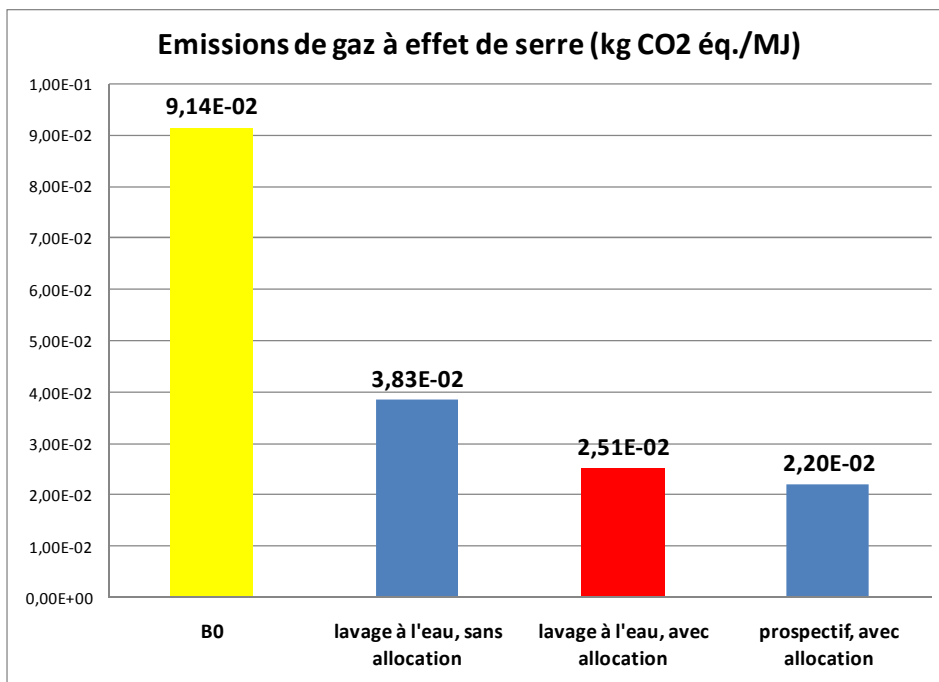


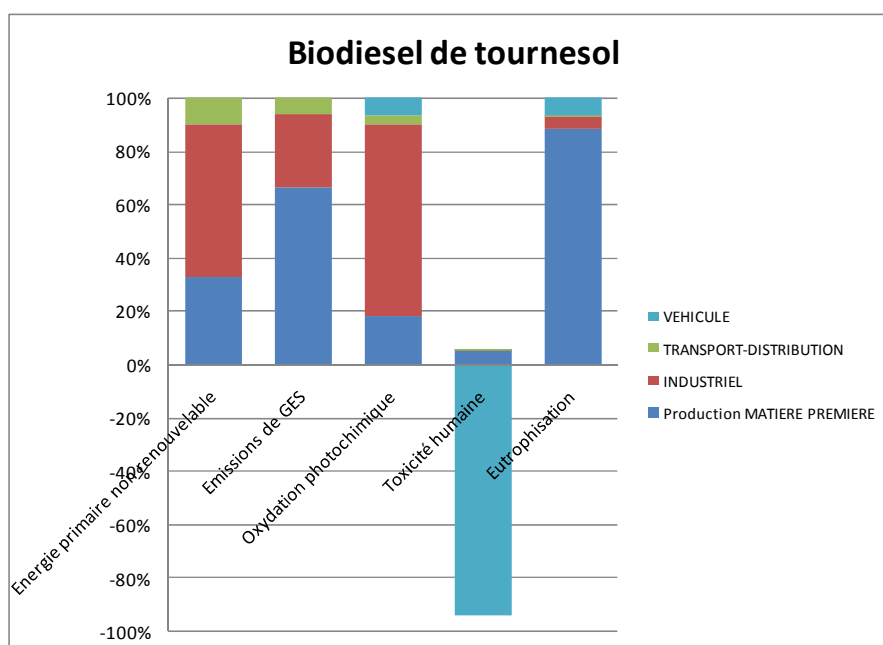
Figure 23 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



6.3.2.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 24 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 85 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	2,51E-02	1,67E-02	6,90E-03	1,52E-03	0,00E+00 ¹³
filière principale N ₂ O valeur par défaut GIEC	2,21E-02	1,36E-02	6,90E-03	1,52E-03	0,00E+00
filière principale N ₂ O type JEC	2,26E-02	1,42E-02	6,90E-03	1,52E-03	0,00E+00
Résultats étude JEC	2,59E-02	2,80E-02	-3,71E-03	1,55E-03	0,00E+00
Résultats étude ADEME/DIREM	1,65E-02	9,95E-03	5,81E-03	7,89E-04	0,00E+00

Le remplacement des valeurs de N₂O par des valeurs N₂O GIEC et de JEC diminue légèrement les émissions de GES par rapport à la filière de référence. Les résultats totaux pour les émissions de GES sont très proches des données JEC.

¹³ Ces émissions nulles viennent du fait que les biocarburants sont considérés neutres sur l'étape de combustion car émettant du CO₂ d'origine biogénique.

6.3.3. EMHV DE SOJA

	EMHV de soja
Filière principale considérée	extraction d'huile locale, moyenne pondérée entre Brésil (33%) et USA (67%), estérification France Raffinage chimique, Catalyse homogène, Lavage à l'eau
Sous filières :	Valeurs USA et valeurs Brésil, même technologie.
Origine des données	Bibliographie pour la phase culture et extraction d'huile, et données PROLEA et BIOCAR pour l'estérification France
Validité des données	France 2007- 2010, avec import depuis le Brésil et les USA

6.3.3.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 86 – Comparaison des impacts environnementaux du biodiesel de soja et du diesel par MJ de carburant

Soja	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJf / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,387	2,11E-02	1,22E-05	-6,53E-01	1,79E-04
Réduction	69%	77%	-	+++	--

6.3.3.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 25 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

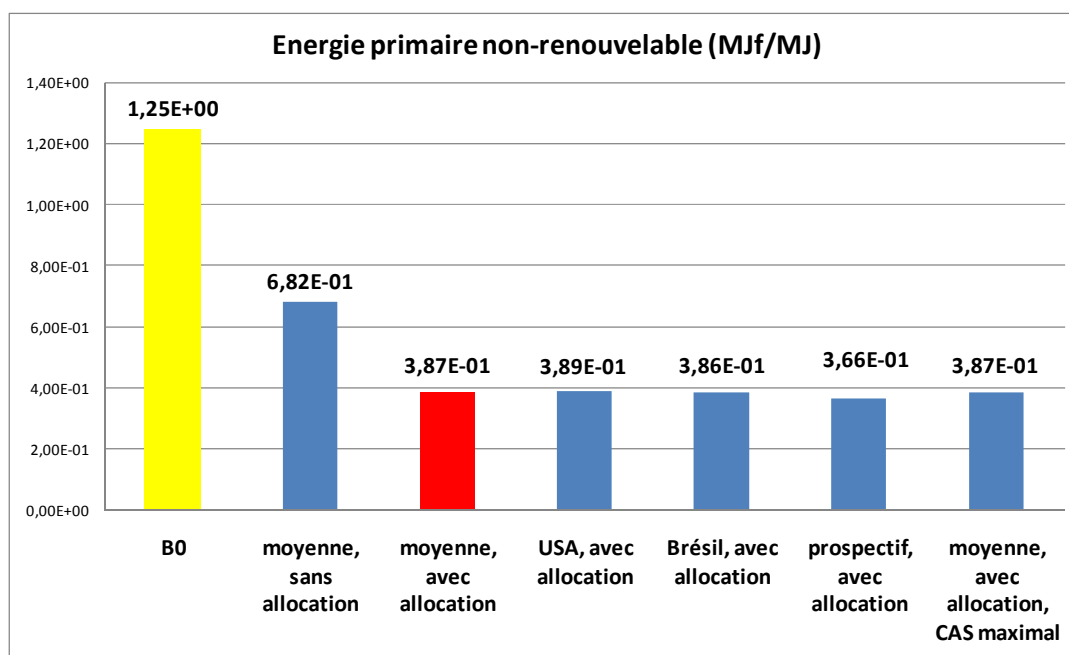
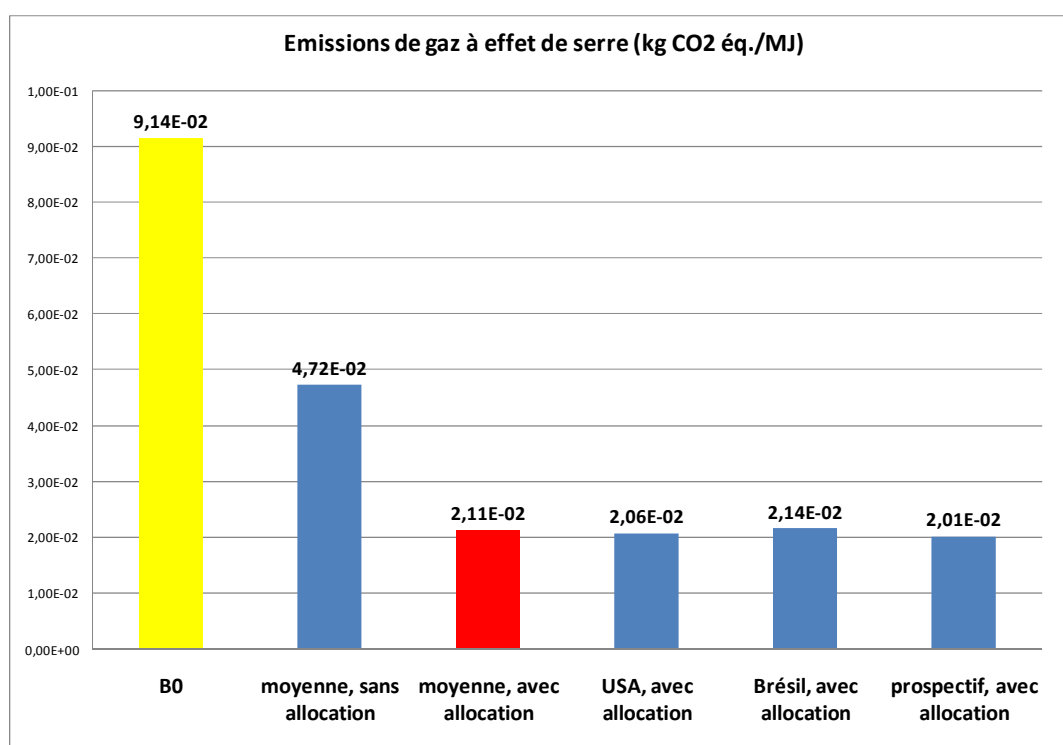


Figure 26 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



Sans tenir compte du changement d'affectation des sols, la sous filière Brésil consomme légèrement plus d'énergie primaire non renouvelable et émet également un peu plus de GES que la sous filière USA. En revanche, les écarts sont inversés sur les trois autres indicateurs mais restent très peu marqués.

6.3.3.3 Changements d'affectation directs et indirects des sols

Figure 27 - Impact potentiel du CAS direct pour l'EMHV de Soja brésilien

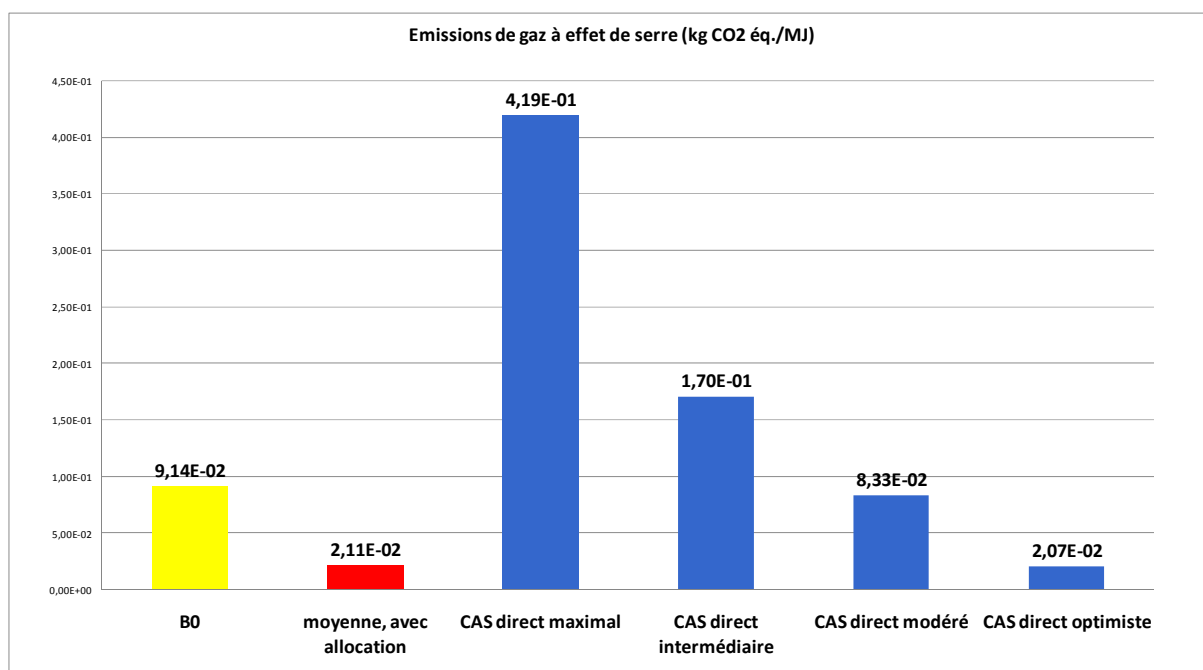
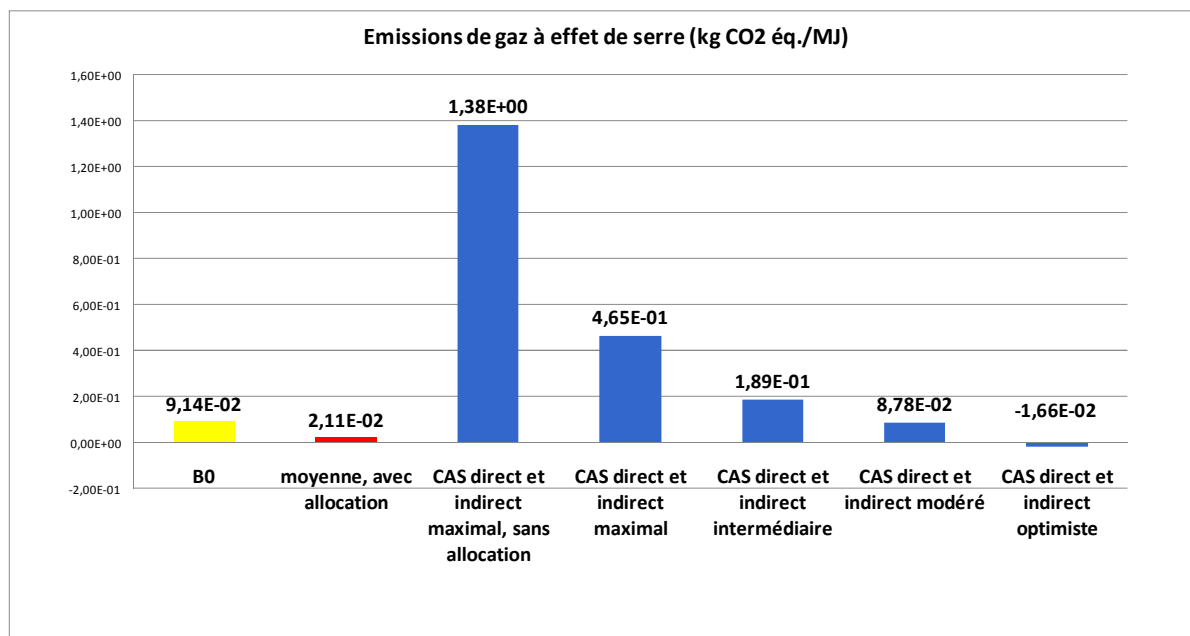


Figure 28 - Impact potentiel du CAS direct pour l'EMHV de Soja brésilien et indirect pour l'EMHV de Soja USA

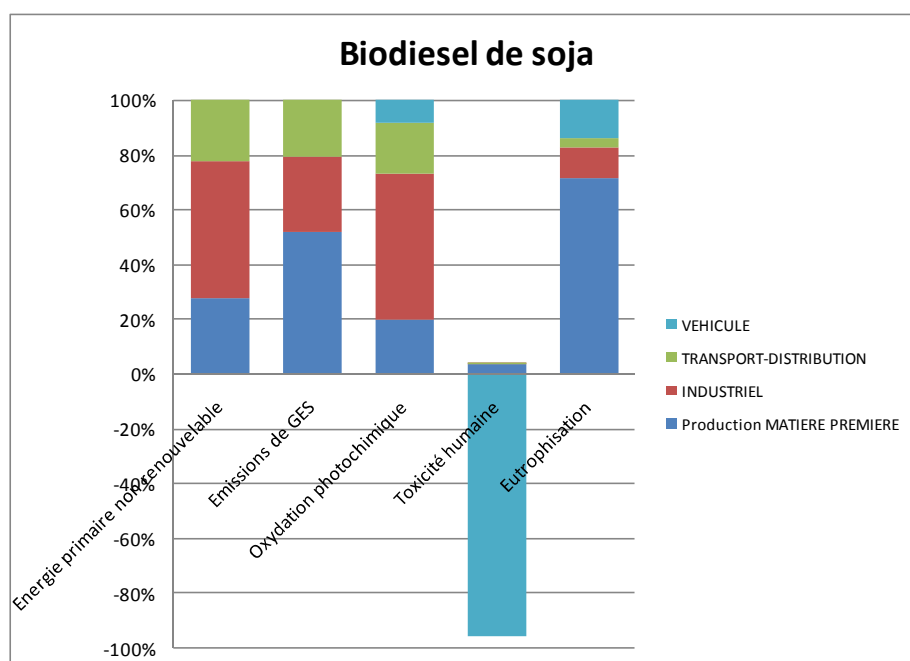


Les valeurs introduites en émission de CO₂ pour le Changement direct d'Affectation des Sols (CAS) le sont dans le cadre d'une analyse de sensibilité sur ce paramètre. Voir le chapitre 8 pour plus de détail.

6.3.3.4 Analyse des résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 29 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 87 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	2,11E-02	1,10E-02	5,77E-03	4,39E-03	0,00E+00
filière principale N ₂ O valeur par défaut GIEC	1,95E-02	9,39E-03	5,77E-03	4,39E-03	0,00E+00
filière principale N ₂ O type JEC	1,79E-02	7,72E-03	5,77E-03	4,39E-03	0,00E+00
Résultats étude JEC	7,28E-02	5,64E-02	-2,08E-02	3,72E-02	0,00E+00
Résultats étude ADEME/DIREM	-	-	-	-	-

Le remplacement des valeurs de N₂O par des valeurs N₂O GIEC et JEC diminue les émissions de GES par rapport à la filière de référence (moyenne, avec allocation). La filière de référence donne des résultats totaux pour les émissions de GES plus faibles que les données JEC. Les différences sont majoritairement dues aux valeurs obtenues pour l'étape agricole et pour l'étape de transport/distribution.

6.3.4. EMHV DE PALME

	EMHV de PALME
Filière principale modélisée	Emissions cultures pondérées entre les 2 pays (60% Malaisie, 40% Indonésie), usinage local, estérification France Raffinage physique, Catalyse homogène, Lavage à l'eau
Origine des données	Bibliographie pour la phase culture et usinage, et données PROLEA et BIOCAR pour l'estérification France
Validité des données	France 2009, avec import de Malaisie et Indonésie

6.3.4.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 88 – Comparaison des impacts environnementaux du biodiesel de palme et du diesel par MJ de carburant

Palme	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJf / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,271	2,18E-02	7,93E-06	-6,46E-01	1,84E-04
Réduction	78%	76%	+	+++	--

Sans prendre en compte d'éléments de changement d'affectation des sols, le bilan de la filière d'ester méthylique de palme est très positif sur les indicateurs « consommation d'énergie non renouvelable » et « émission de GES ». Notons aussi un résultat plus faible que les autres esters végétaux sur le potentiel d'oxydation photochimique, et ce en raison de l'absence d'utilisation d'hexane pour l'extraction.

6.3.4.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 30 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

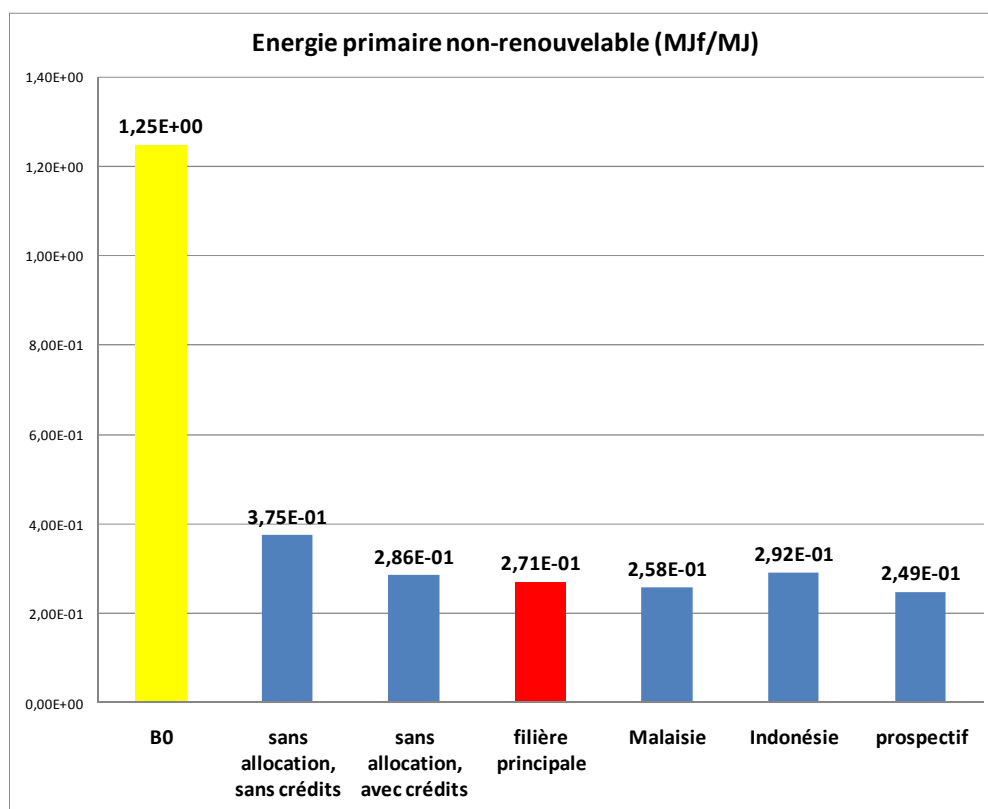
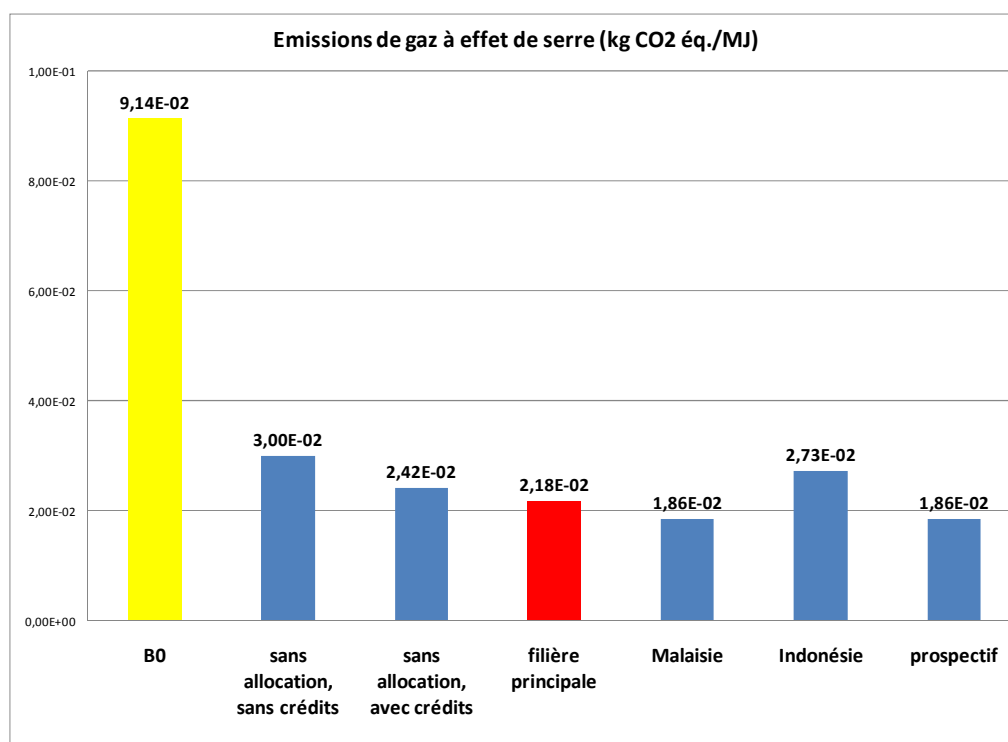


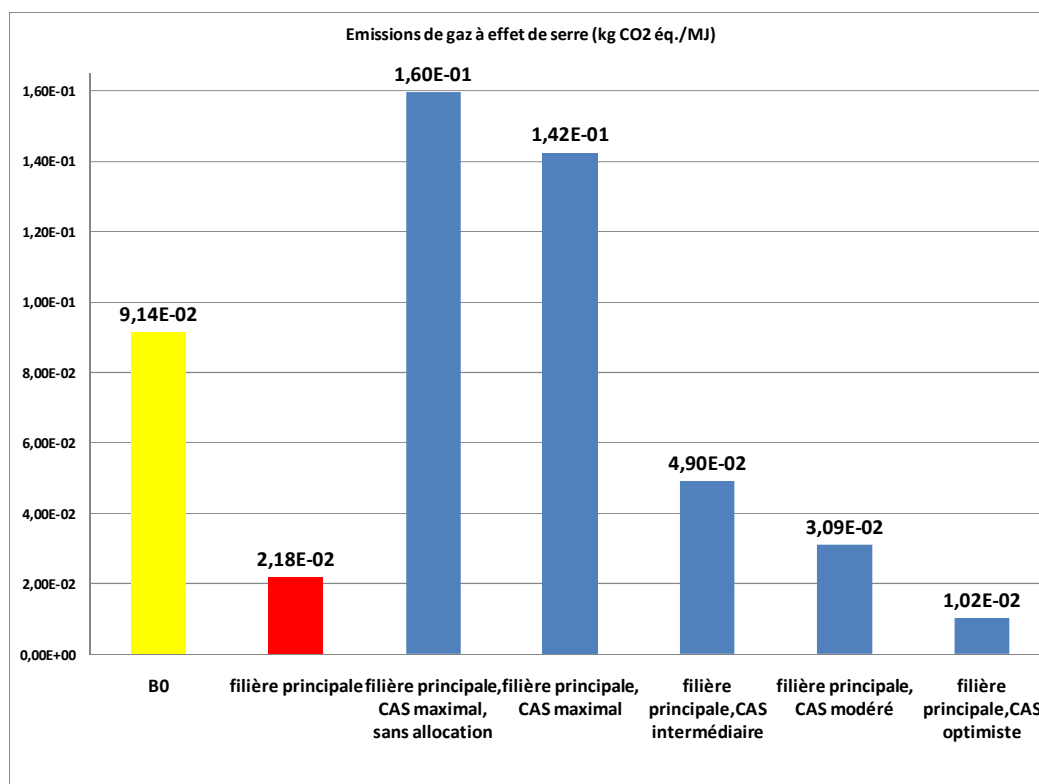
Figure 31 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



Le scénario Indonésien consomme plus d'énergie primaire non renouvelable et émet également plus de GES que celui de Malaisie. Il faut noter que la prise en compte des crédits de substitution pour la biomasse surnuméraire produite, supposée remplacer du gaz naturel brûlé, explique le niveau bas de l'indicateur de consommation d'énergie non renouvelable.

6.3.4.3 Analyse de sensibilité : Changement d'Affectation des sols

Figure 32 – EMHV de Palme : Impacts potentiels du changement d'affectation des sols direct

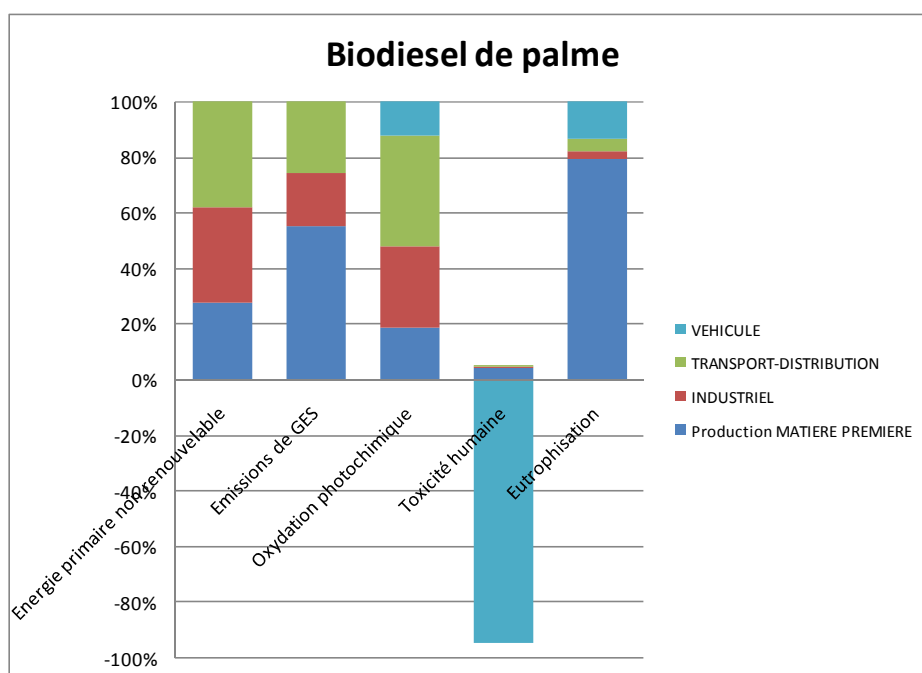


L'ester de palme perd son intérêt environnemental si le scénario le plus pessimiste correspond à la réalité. Pour des scénarii plus modérés, il arrive à garder un intérêt relatif par rapport à la filière fossile de référence. Pour plus d'explication sur ces calculs, voir les parties méthodologie (chapitre 4) et analyse de sensibilité (chapitre 8).

6.3.4.4 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 33 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 89 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	2,18E-02	1,20E-02	4,15E-03	5,65E-03	0,00E+00
filière principale, N ₂ O type JEC	2,44E-02	1,46E-02	4,15E-03	5,65E-03	0,00E+00
Résultats étude JEC	4,84E-02	1,57E-02	2,67E-02	5,88E-03	0,00E+00

Le remplacement des valeurs de N₂O par des valeurs N₂O JEC augmente les émissions de GES par rapport à la filière de référence.

La filière de référence donne des résultats totaux pour les émissions de GES plus faibles que les données JEC. Les différences sont majoritairement dues aux valeurs obtenues pour l'étape industrielle et donc probablement aux hypothèses de substitution d'énergie surnuméraire.

6.3.5. HVP100

Filière considérée :	Huile Végétale Pure
Filière principale	Presse électrique de 7 à 10 kWhe, presse à la ferme
Origine des données	Bibliographie et échanges avec la FNCUMA
Validité des données	huile de ferme, production de taille moyenne et petite.

6.3.5.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 90 – Comparaison des impacts environnementaux du HVP100 et du diesel par MJ de carburant

HVP100, par MJ d'HVP	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,226	3,18E-02	5,71E-06	4,20E-01	3,46E-04
Réduction	81,9%	65,2%	+	=	--

6.3.5.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 34 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

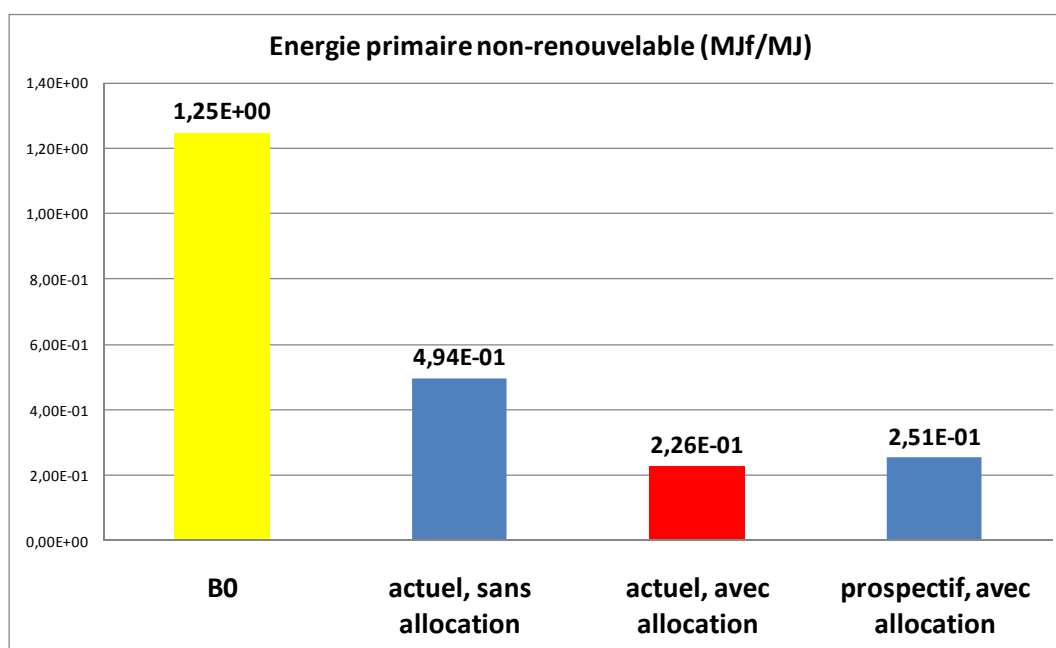
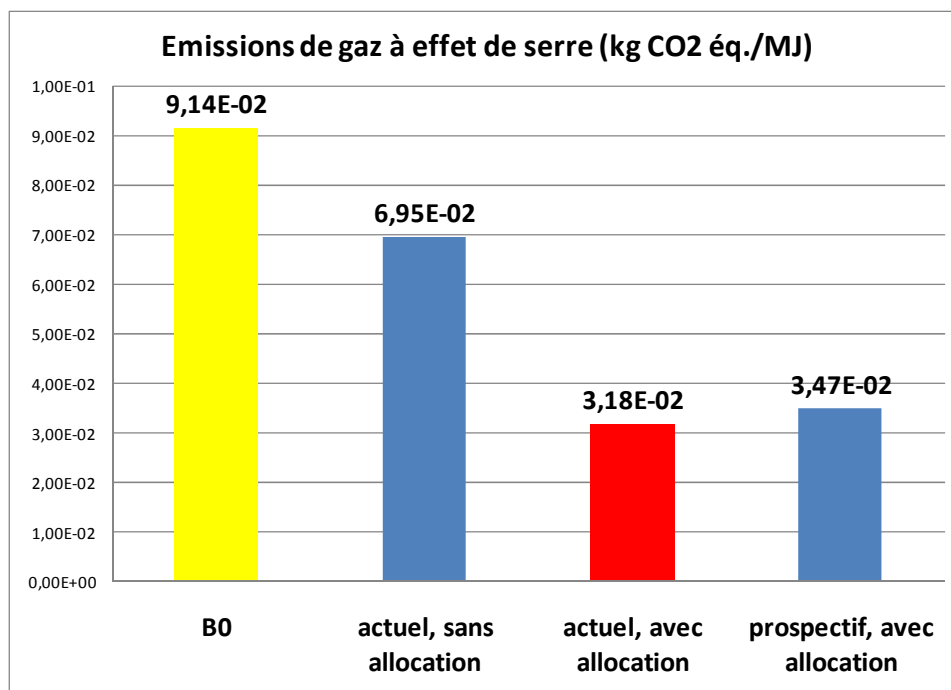


Figure 35 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



Il est intéressant de noter que l'écart sur les GES n'est pas si marqué qu'attendu avec la filière EMHV de colza, du fait d'un rendement moindre en huile à l'hectare et d'un PCI légèrement inférieur.

Les résultats sur l'indicateur de toxicité humaine ne suivent pas la tendance des esters, le comportement de l'huile lors de la combustion n'étant pas aussi favorable que pour les esters. Enfin, on peut souligner l'augmentation légère mais atypique qu'entraîne la modélisation prospective. L'amélioration des rendements d'huile obtenue lors du pressage augmente la charge de l'amont agricole portée par l'huile par rapport au tourteau (cette allocation à l'huile passe de 46% à 49%).

6.3.5.3 Analyse de ces résultats

➤ Analyse de l'effet de la surconsommation

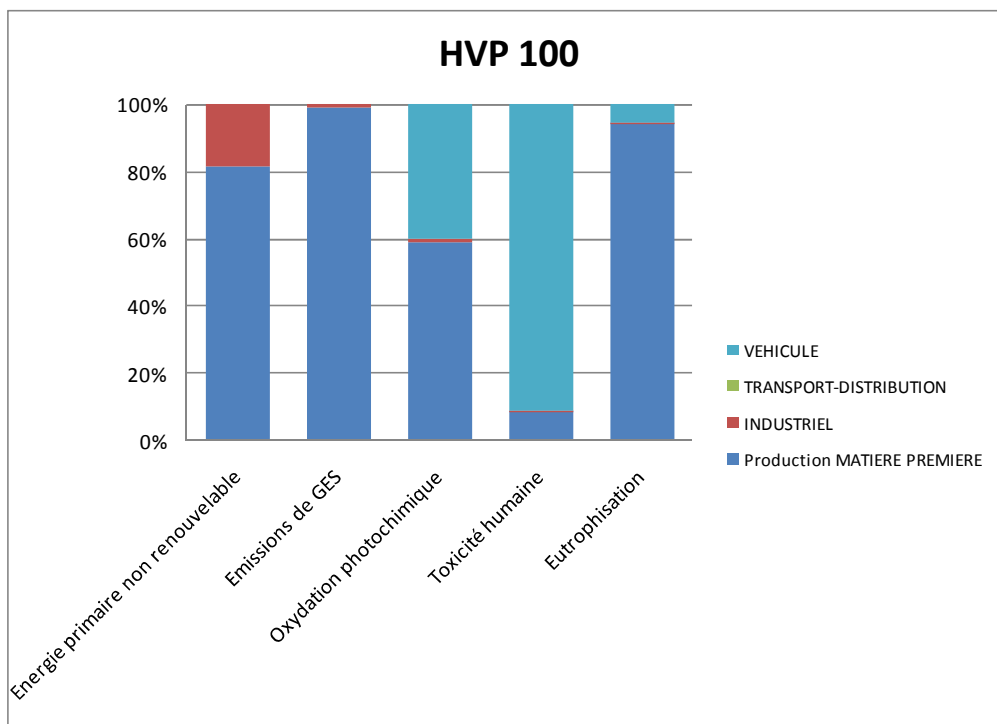
Les résultats présentés précédemment sont donnés par MJ de carburant par cohérence avec les autres filières. Hors il est constaté une légère surconsommation du véhicule (augmentation du rendement moteur et donc des MJ consommés par km. Les valeurs par km parcouru, l'unité fonctionnelle de départ, sont donc nécessaires pour bien s'assurer de la bonne comparaison des carburants. Elles sont mentionnées ci-dessous, afin de quantifier l'impact de la surconsommation prise en compte pour l'huile pure (+5%, soit 1,68 MJ / km). Même si les gains par km parcouru sont légèrement pénalisés par cet effet, cela reste très marginal et ne change pas le niveau global de réduction atteignable par cette filière en termes de consommation d'énergie non renouvelable et d'émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 91 – Comparaison des impacts environnementaux du HVP100 et du diesel par km parcouru

HVP100, par km parcouru	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / km	kg éq. de CO ₂ / km	kg éq. de C ₂ H ₄ / km	kg éq. de 1,4-DB / km	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / km
Filière fossile de référence	2,12	1,55E-01	1,91E-05	7,01E-01	6,30E-05
Filière principale étudiée	0,404	5,68E-02	1,02E-05	7,50E-01	6,17E-04
Gain (km parcouru)	80,9%	63,4%	+	=	--
Rappel : réduction (par MJ de carburant)	81,9%	65,2%	+	=	--

➤ Désagrégation par étapes

Figure 36 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



6.3.6. EMHAU

Filière étudiée	ESTER METHYLIQUE D'HUILES ALIMENTAIRES USAGEES
filière principale : « valeurs générales »	Pré-estérification acide + lavage à l'eau, vapeur d'origine gaz naturel Le terme « général » a été utilisé pour signifier que ce calcul est construit sur une hypothèse plus large que les données transmises, puisque la vapeur est supposée venir entièrement de gaz naturel.
Filière « valeur actuelle France »	Les données réellement transmises figurent sous l'appellation « actuel France » et représentent un fonctionnement avec la chaleur issue de la récupération ou valorisation de l'énergie issue de l'incinération des déchets.
Origine des données	VEOLIA
Validité des données	Sites VEOLIA France

6.3.6.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 92 – Comparaison des impacts environnementaux de l'EMHAU et du diesel par MJ de carburant

EMHAU	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,236	8,70E-03	4,69E-06	-6,78E-01	5,00E-05
Réduction	81%	90%	-	+++	=

6.3.6.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 37 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

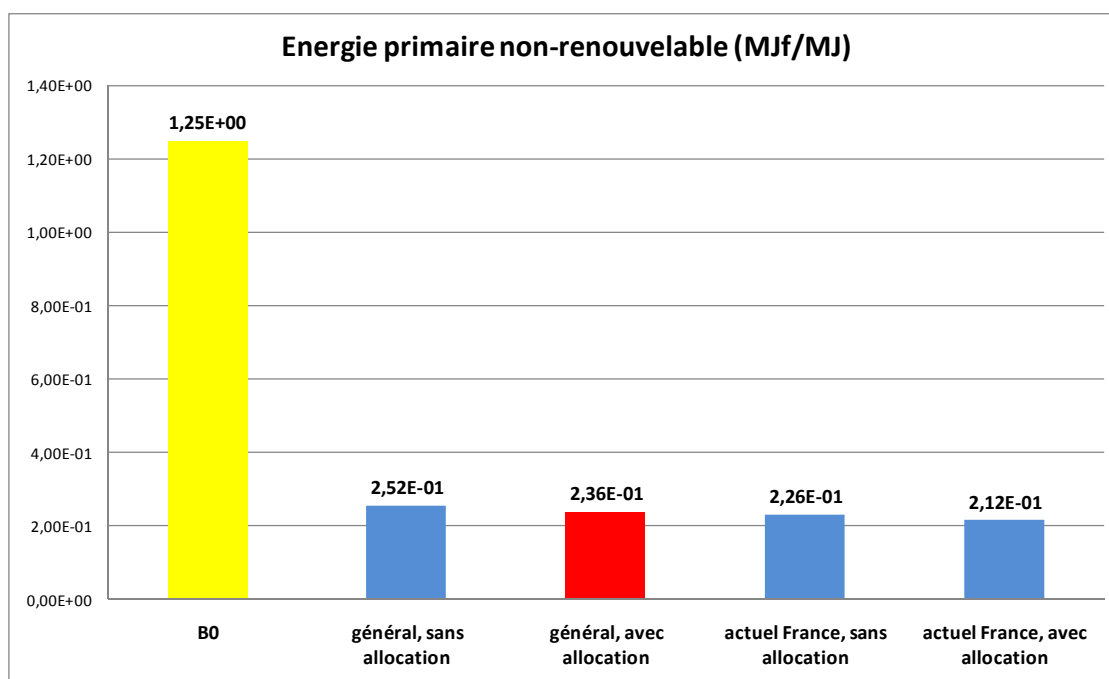
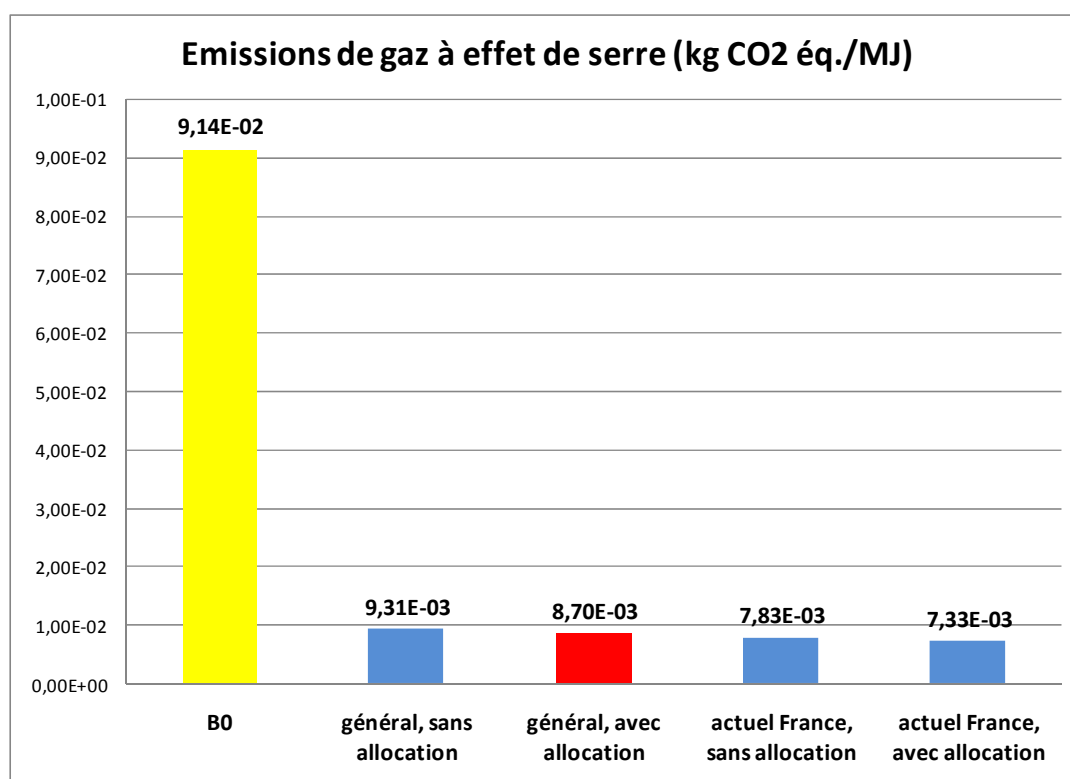


Figure 38 – Emissions de GES par MJ de biocarburant

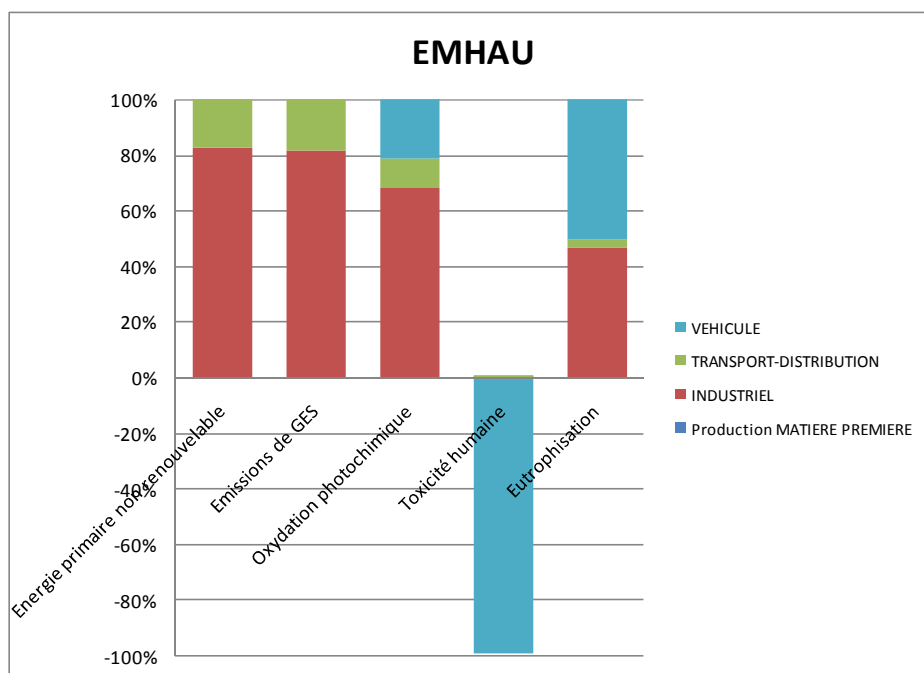


Dans la situation quantifiée ici de non prise en compte d'impact amont pour les huiles collectées, les réductions obtenues sont très intéressantes pour ce type de filière. Le calcul « actuel en France » recouvre la situation du site en fonctionnement en France, à savoir que la vapeur provient de l'énergie d'un incinérateur.

6.3.6.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 39 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



On constate que pour ce type de filière, l'étape industrielle contribue le plus à la consommation d'énergie primaire non renouvelable et aux émissions de GES. Pour ces procédés sans hexane, l'inventaire utilisé pour les sites d'EMHV classiques a été adapté. Malgré cela, le niveau d'émission de photo oxydant via les COV reste important pour l'étape industrielle dans le bilan global.

6.3.7. EMGA

ESTERS METHYLIQUES DE GRAISSES ANIMALES	
Filière principale modélisée	Pré-estérification acide + distillation aval. Pas de prise en compte de l'étape de production de la graisse à partir des sous-produits.
Origine des données	Adaptation d'autres données, suite à échange avec SARIA pour valider le procédé général.
Validité des données	Industrielles : adaptation de données d'autres filières (EMHAU)

6.3.7.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 93 – Comparaison des impacts environnementaux de l'EMGA et du diesel par MJ de carburant

EMGA	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
Filière principale étudiée	0,234	8,44E-03	4,57E-06	-6,78E-01	5,15E-05
Réduction	81%	91%	+	+++	=

6.3.7.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 40 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

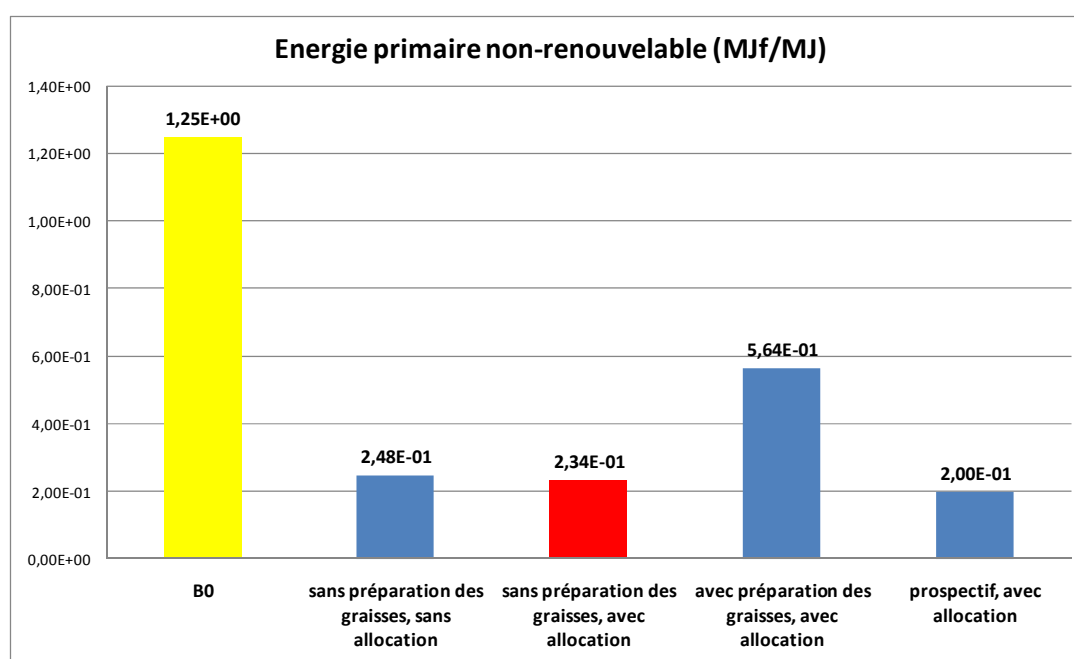
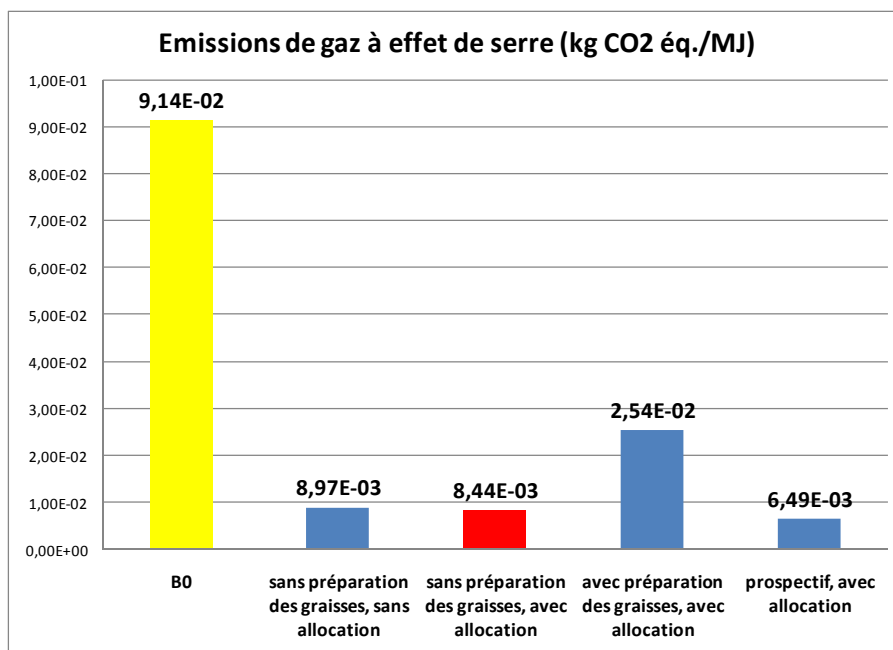


Figure 41 – Emissions de GES par MJ de biocarburant

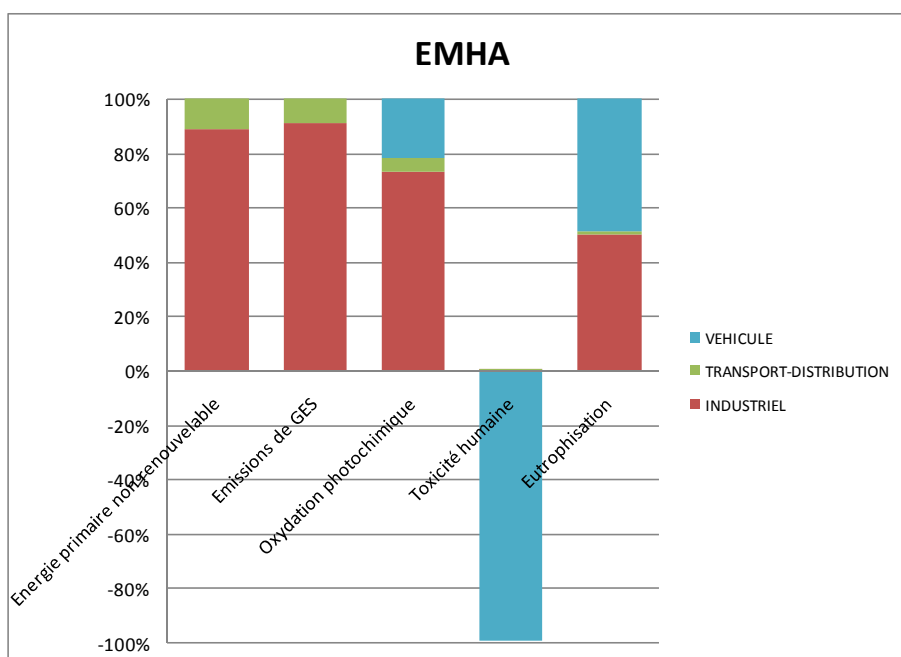


La simulation avec une prise en compte des charges des étapes de traitement des sous-produits démontre un impact potentiel fort sur l'énergie consommée, mais limité sur les émissions de GES.

6.3.7.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 42 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



Les mêmes remarques que pour les EMHAU s'appliquent.

6.3.8. ETHANOL DE BLE

Filière étudiée	ETHANOL DE BLE
Filière principale	Dry mill, sans cogénération.
Sous filière	Avec cogénération. Calcul BIO pour simuler les données énergies
Origine des données	TEREOS, site de Lillebonne
Validité des données	Agricoles : moyenne des dernières années pour les régions du bassin d'approvisionnement français. Industrielles : début 2009, représentatives fonctionnement optimisé

6.3.8.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 94 – Comparaison des impacts environnementaux de l'éthanol de blé et de l'essence par MJ de carburant

Blé	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Filière principale étudiée	0,620	4,62E-02	-6,07E-06	5,11E-02	4,11E-04
Réduction	49%	49%	++	-	--

6.3.8.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 43 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

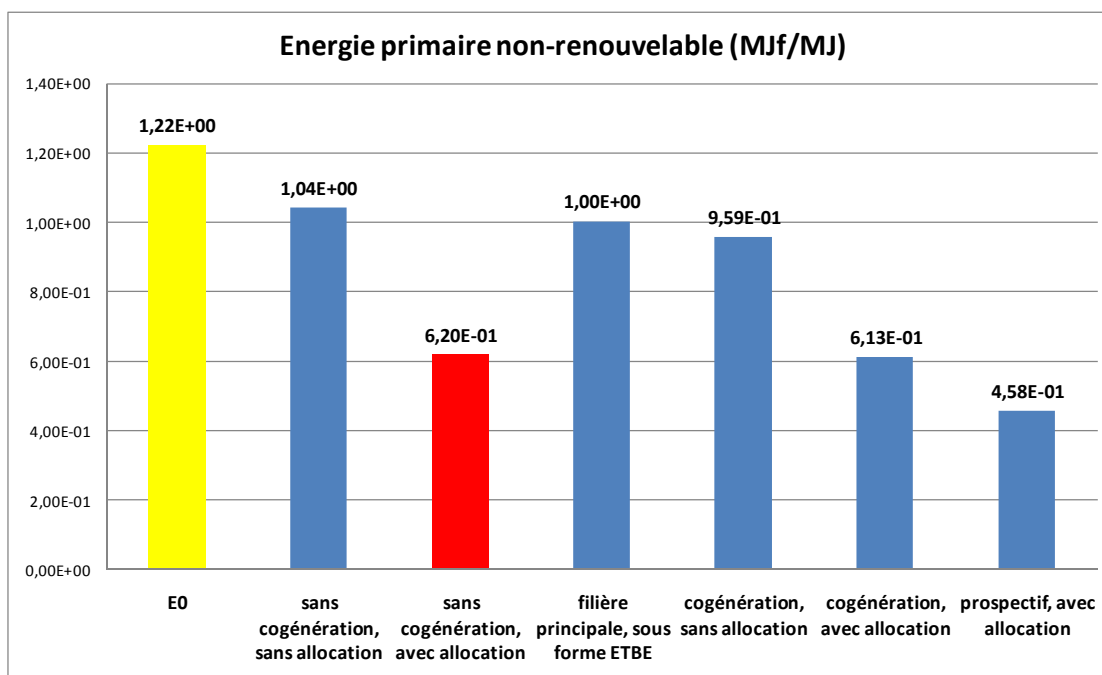
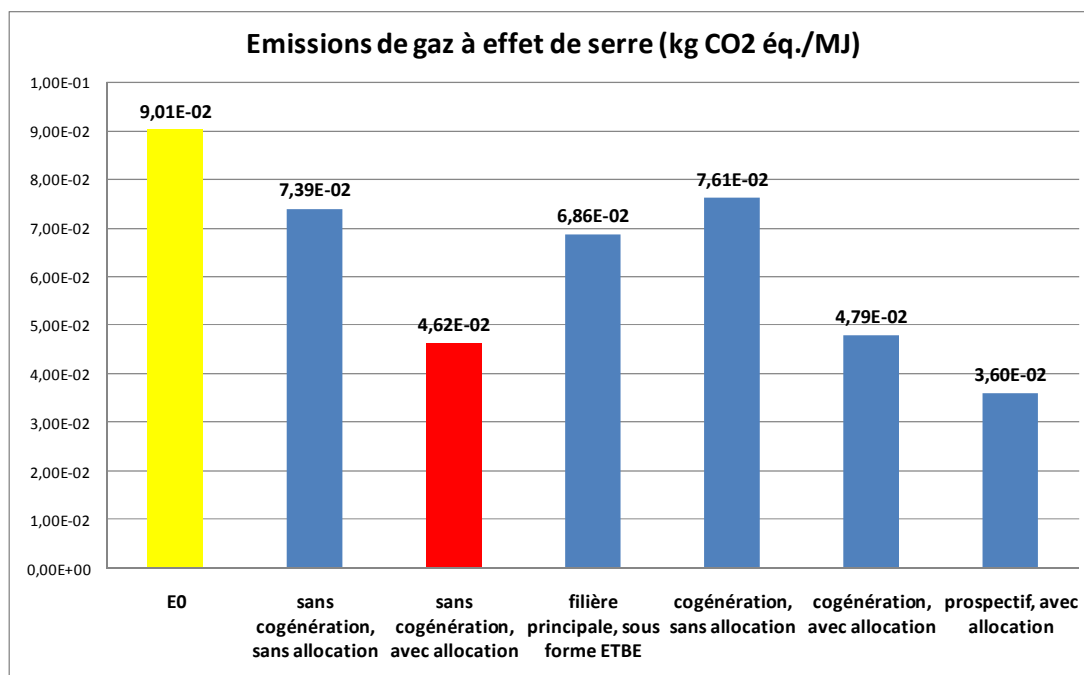


Figure 44 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



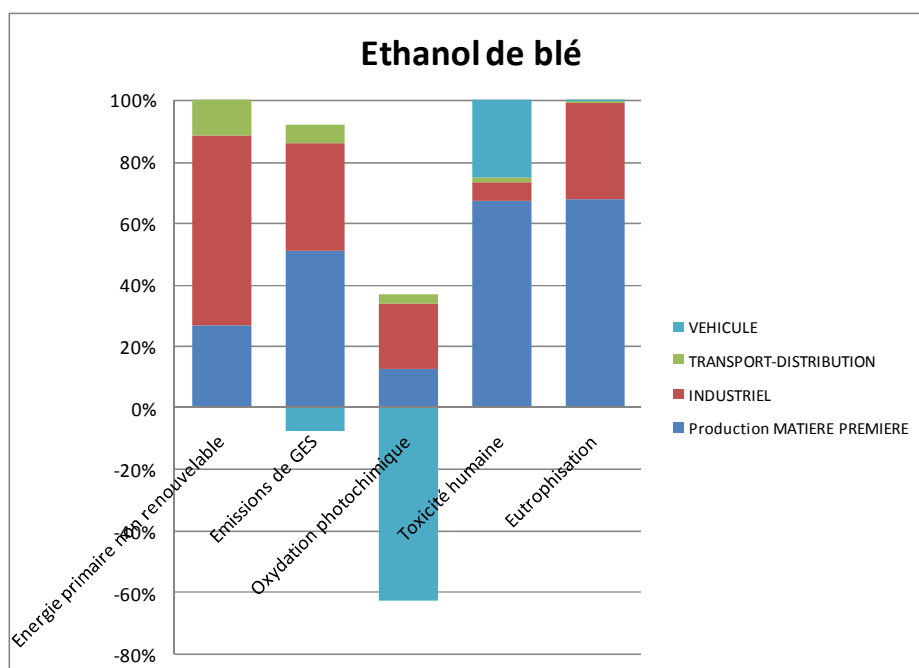
La simulation faite sur un fonctionnement avec cogénération de gaz naturel montre l'impact relativement faible dans le bilan complet de ce choix. La cogénération permet d'économiser un peu d'énergie fossile du fait d'une énergie nucléaire consommant 3,3 MJf/MJe de produit. En revanche, les émissions de GES sont supérieures du fait d'émissions de combustion de gaz naturel supérieur à celle du nucléaire.

Soulignons à nouveau que la valeur donnée sans allocation inclut 100% de l'énergie de séchage des drèches. Ce séchage est entièrement alloué aux drèches pour le résultat principal, conformément à la norme ISO recommandant de séparer les procédés dès que possible.

6.3.8.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 45 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 95 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	4,62E-02	2,79E-02	1,92E-02	3,51E-03	-4,35E-03
filière principale autre pondération des régions	4,74E-02	2,91E-02	1,92E-02	3,51E-03	-4,35E-03
filière principale N ₂ O type GIEC	4,84E-02	3,01E-02	1,92E-02	3,51E-03	-4,35E-03
filière principale N ₂ O type JEC	4,23E-02	2,40E-02	1,92E-02	3,51E-03	-4,35E-03
étude JEC	6,12E-02	3,94E-02	1,97E-02	2,17E-03	0
étude ADEME/DIREM	3,44E-02	1,05E-02	2,37E-02	2,40E-04	0

Notons tout d'abord que le résultat de la filière principale intègre une réduction de 4,3 g eq. CO₂ du fait de l'étape véhicule dans cette modélisation (réduction des émissions globales de CO₂).

La filière éthanol de blé est une des filières où il y a le plus de différences sur les modélisations des émissions de N₂O. Les valeurs prises sur ce paramètre par l'étude JEC ou par l'étude ADEME-DIREM sont bien plus faibles que celles de la présente étude. Un calcul faisant varier la pondération affectée aux régions est proposé ici. La nouvelle pondération se base sur la part respective des 6 régions françaises considérées dans la production totale de ces dites régions. L'écart ainsi mesuré donne une idée de la sensibilité de ce paramètre, qu'on pourrait qualifier de faible dans le cas où l'on considère des données moyennées entre régions (+/- 1 g eCO₂/MJ éthanol), et comme modéré lorsqu'on regarde d'une région à une autre (calcul non présenté ici : +/- 5 g eCO₂/MJ éthanol).

6.3.9. ETHANOL DE MAIS

Filière étudiée	Ethanol de maïs
filière principale	Dry mill, sans cogénération
Origine des données	ABENGOA, site de Lacq
Validité des données	Agricoles : moyenne des dernières années pour la région Aquitaine. Industrielles : fonctionnement début 2009, représentatif fonctionnement en routine

6.3.9.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 96 – Comparaison des impacts environnementaux de l'éthanol de maïs et de l'essence par MJ de carburant

Maïs	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,22	1,02E-01	2,00E-05	2,05E-02	1,81E-05
Filière principale étudiée	0,575	3,98E-02	-6,32E-06	4,15E-02	3,79E-04
Réduction	53%	56%	++	-	--

6.3.9.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 46 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

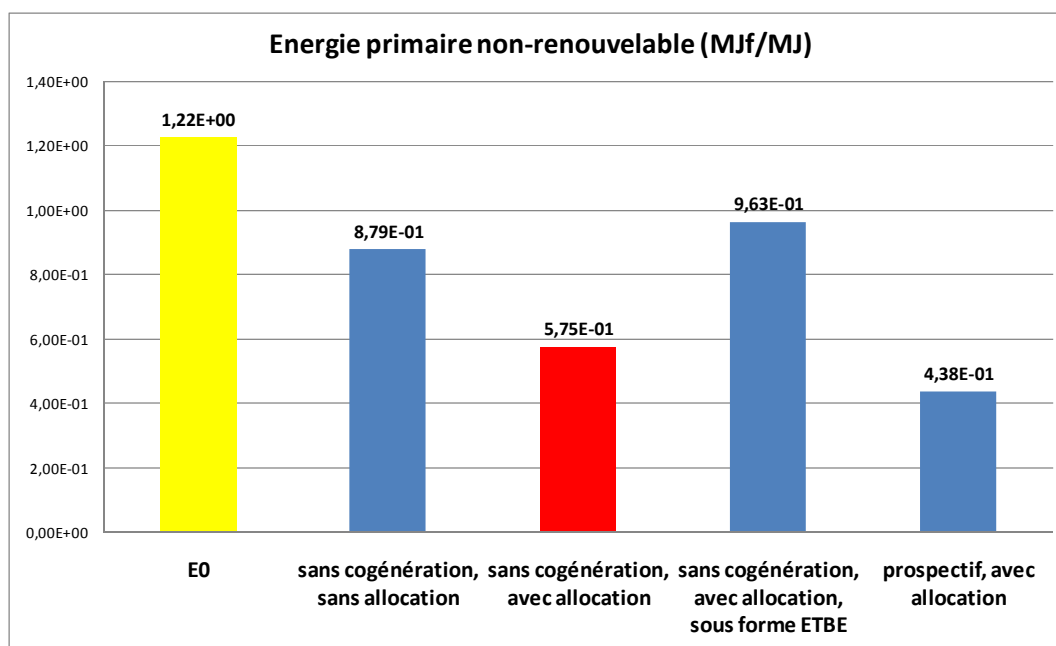
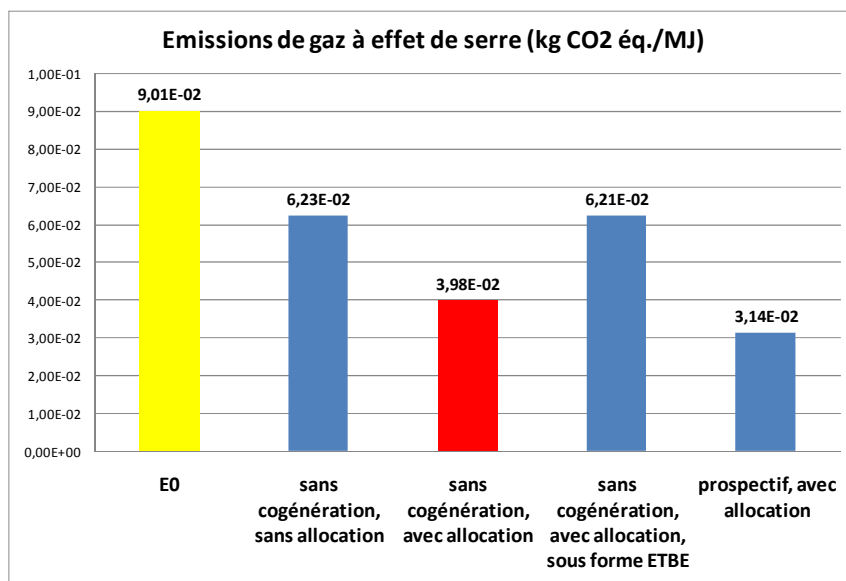


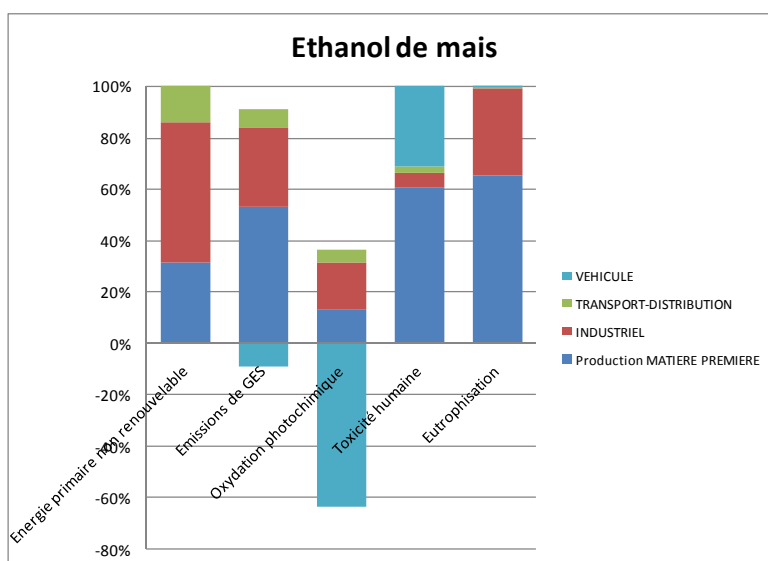
Figure 47 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



6.3.9.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 48 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 97 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg eq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	3,98E-02	2,57E-02	1,50E-02	3,51E-03	-4,35E-03
filière principale N ₂ O type GIEC	4,21E-02	2,80E-02	1,50E-02	3,51E-03	-4,35E-03
filière principale N ₂ O type JEC	4,06E-02	2,65E-02	1,50E-02	3,51E-03	-4,35E-03

6.3.10. ETHANOL DE BETTERAVE

Ethanol de betterave	
Procédés modélisés	Sucrierie et distillerie attenantes, avec cogénération Calculs BIO pour une simulation sans cogénération.
Origine des données	Cristal Union, site d'Arcis sur Aube
Validité des données	Agricoles : moyenne des dernières années. Industrielles : Campagne 2007-2008, campagne représentative

6.3.10.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 98 – Comparaison des impacts environnementaux de l'éthanol de betterave et de l'essence par MJ de carburant

Betterave	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Filière principale étudiée, résultat principal (avec allocation)	0,592	3,04E-02	-6,02E-06	3,31E-02	1,95E-04
Réduction	52%	66%	++	-	-

6.3.10.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 49 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

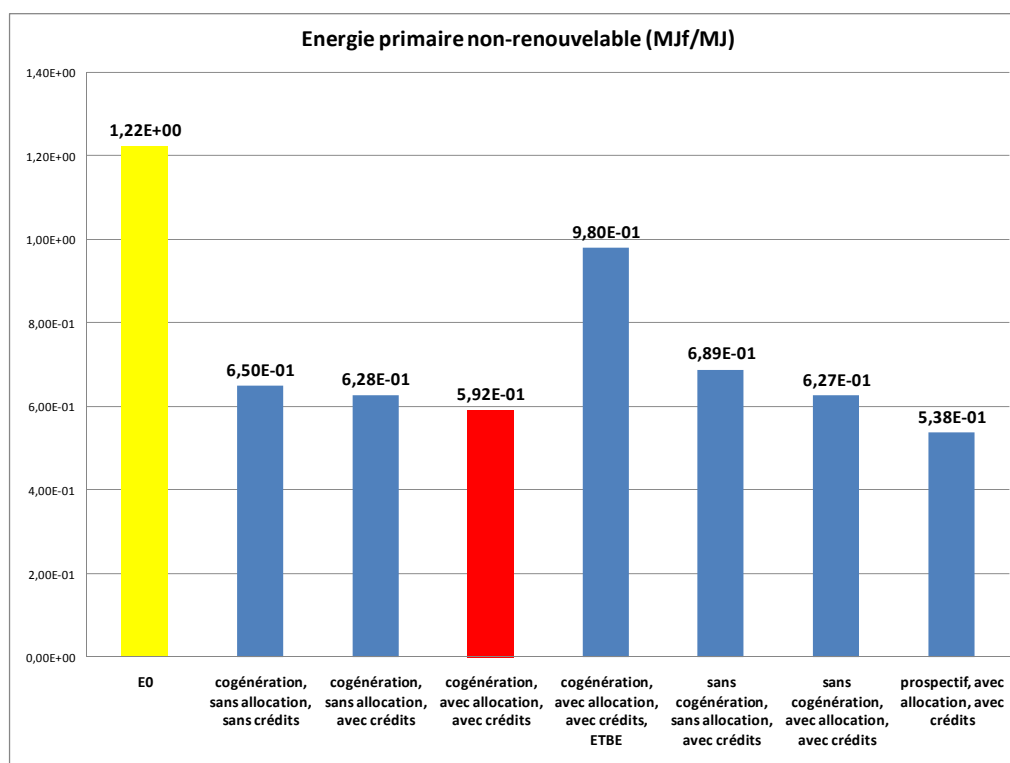
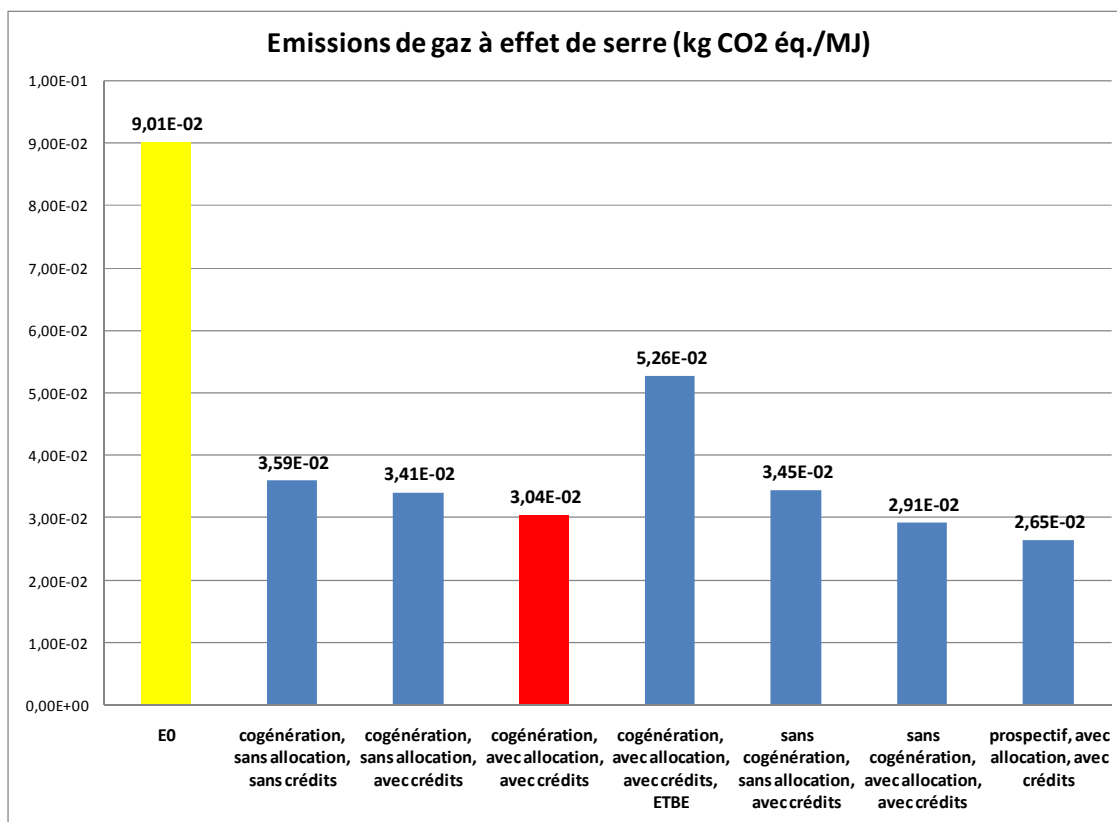


Figure 50 – Emissions de GES par MJ de biocarburant

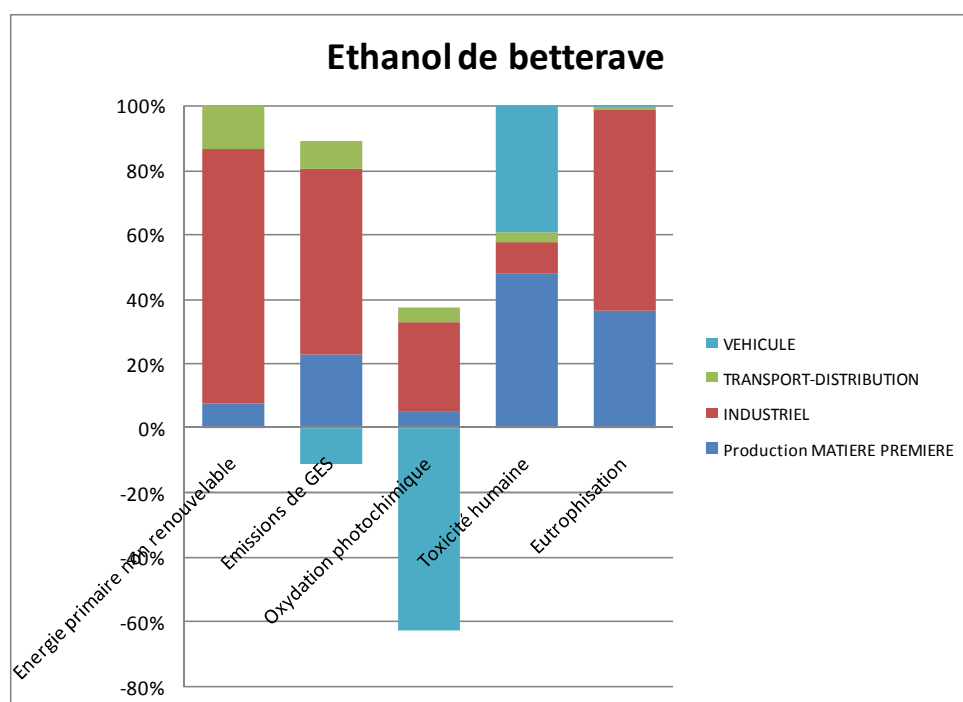


Comme cela a été évoqué dans la présentation de la filière, le résultat sans allocation pour la betterave n'intègre pas la transformation des pulpes surpressées en pulpes déshydratées, étape consommatrice qui a lieu sur un site séparé. Cela explique ainsi en partie que l'écart entre avec et sans allocation soit plus restreint pour cette filière que pour le blé ou le maïs.

6.3.10.3 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 51 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Tableau 99 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	3,04E-02	8,92E-03	2,25E-02	3,33E-03	-4,35E-03
filière principale, N ₂ O estimé d'après les valeurs par défaut du GIEC	3,23E-02	1,09E-02	2,24E-02	3,33E-03	-4,35E-03
filière principale, N ₂ O type JEC	3,09E-02	9,45E-03	2,24E-02	3,33E-03	-4,35E-03
Résultats étude JEC	3,81E-02	1,62E-02	1,92E-02	2,72E-03	0,00E+00
Résultats étude ADEME/DIREM	3,40E-02	8,97E-03	2,37E-02	9,70E-04	0,00E+00

6.3.11. ETHANOL DE CANNE A SUCRE

	ETHANOL DE CANNE A SUCRE
Filière principale	Sucrerie et distillerie attenantes, culture et production Brésil (Après allocation et avec intégration d'éventuels crédits)
Origine des données	Bibliographie (MACEDO, données du « Copersugar technology Center»), région Centre-Sud
Validité des données	représentatif du Brésil car cette région produit environ 90% de l'éthanol brésilien. 2005-2008 et scénario prospectif 2015 adapté d'estimation pour 2020

6.3.11.1 Résultats généraux pour la filière principale

Tableau 100 – Comparaison des impacts environnementaux de l'éthanol de canne à sucre et de l'essence par MJ de carburant

Canne à sucre	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Filière principale étudiée, résultat principal (avec allocation)	0,183	2,53E-02	1,40E-04	3,56E-02	2,19E-04
Réduction	85%	72%	--	-	--

Sans prendre en compte d'éléments liés au changement d'affectation des sols, il apparaît que l'éthanol de canne à sucre est plus avantageux que l'essence pour la consommation d'énergie primaire non renouvelable et les émissions de GES. Par contre, il semble engendrer plus d'oxydation photochimique, et d'eutrophisation que l'essence. L'indicateur « toxicité humaine » laisse penser à une légère dégradation liée à l'usage des pesticides et les apports d'éléments trace, mais dont le niveau reste très dépendant des risques relatifs entre molécule (voir chapitre 7 : quel impact sanitaire des HAP par rapport aux pesticides ?).

6.3.11.2 Résultats des sous filières et de la prospective

Figure 52 – Consommation d'énergie primaire non renouvelable par MJ de biocarburant

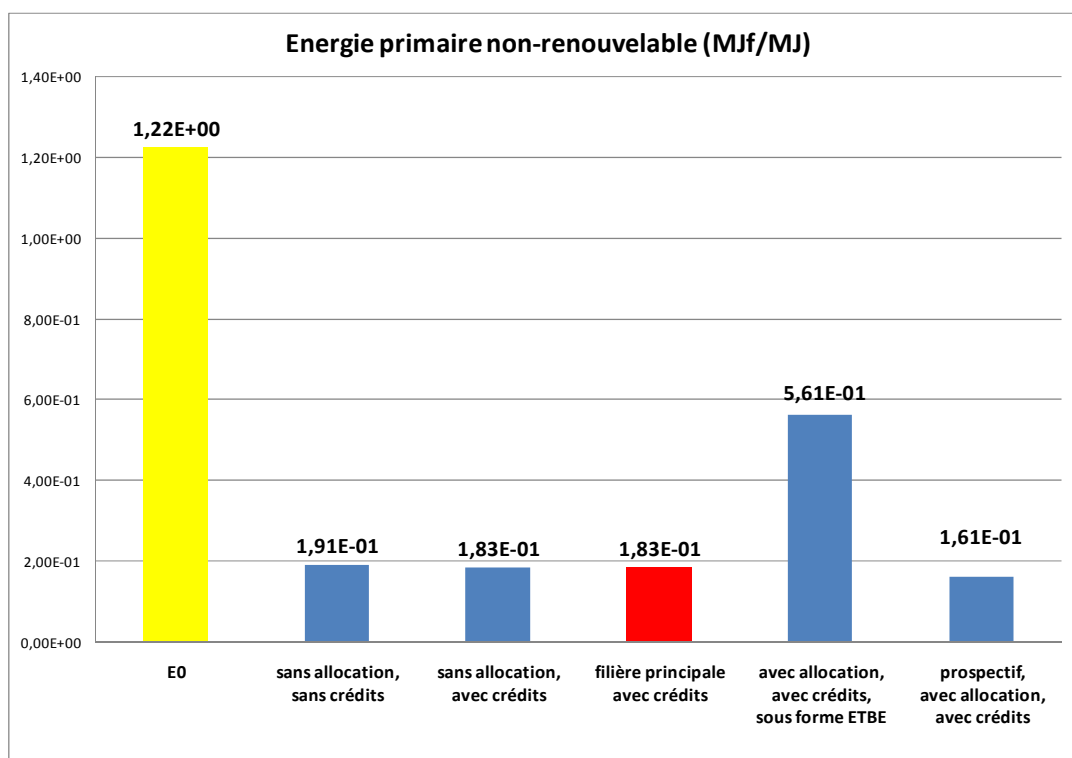
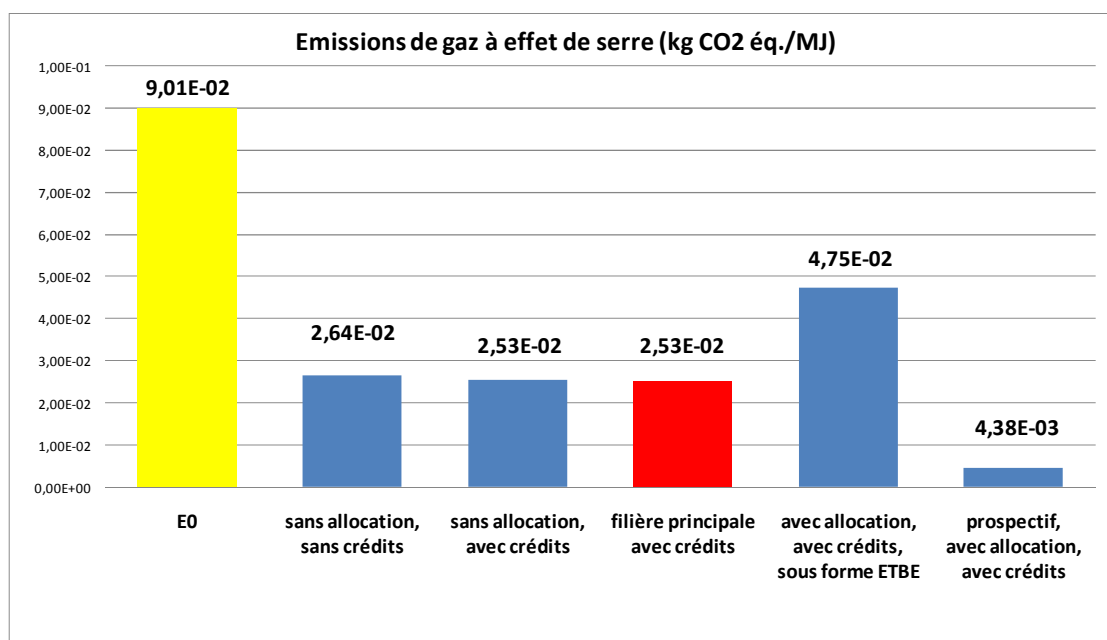
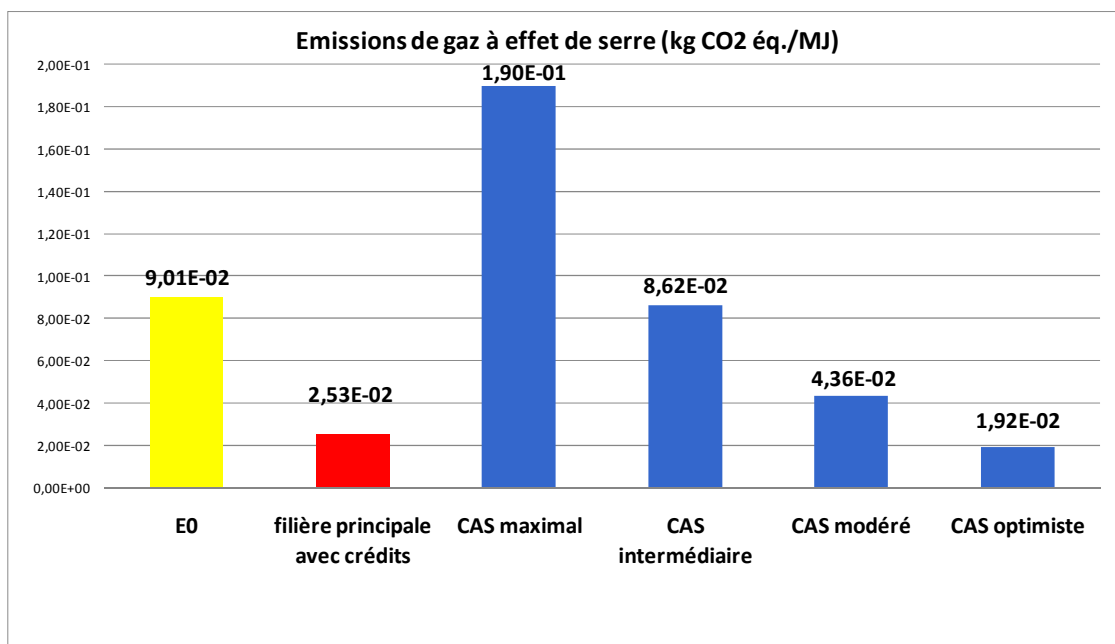


Figure 53 – Emissions de GES par MJ de biocarburant



6.3.11.3 Changement d'Affectation des Sols directs

Figure 54 – Changement direct d'affectation des sols pour la canne à sucre

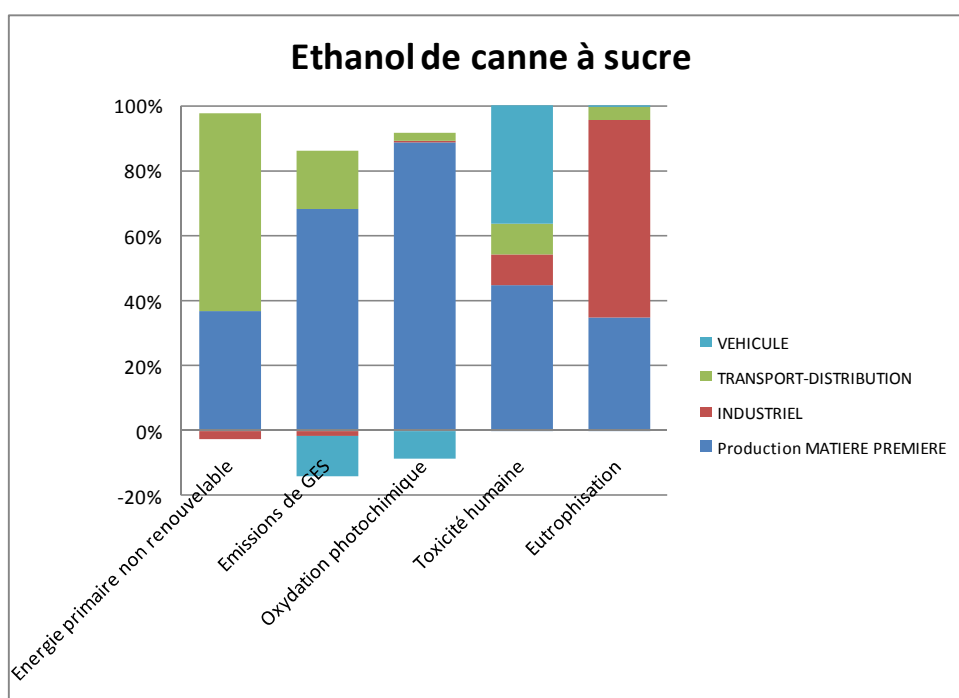


La prise en compte du changement d'affectation des sols modifie fortement le bilan de la filière canne à sucre. Le scénario maximal fait notamment perdre le caractère bénéfique de cette filière.

6.3.11.4 Analyse de ces résultats

➤ Désagrégation par étapes

Figure 55 – Contribution des étapes du cycle de vie du biocarburant pour les 5 indicateurs



On constate que l'hypothèse de substitution énergétique des surplus d'électricité a une influence forte dans le résultat des indicateurs de consommation d'énergie non renouvelable et d'émissions de GES. Cette substitution porte sur de l'électricité brésilienne, issue de l'inventaire ECOINVENT, d'où son faible impact dans l'énergie fossile mobilisée.

➤ **Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies**

Tableau 101 – Comparaison des émissions de GES pour d'autres études et méthodologies

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIEL	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
filière principale	2,53E-02	2,40E-02	-6,28E-04	6,26E-03	-4,35E-03
filière principale, N ₂ O type JEC	2,83E-02	2,70E-02	-6,28E-04	6,26E-03	-4,35E-03
données JEC	2,42E-02	1,45E-02	7,30E-04	8,98E-03	0,00E+00

Le remplacement des valeurs de N₂O par des valeurs N₂O JEC augmente les émissions de GES par rapport à la filière de référence. La filière de référence donne des résultats totaux pour les émissions de GES plus faibles que les données JEC, et ce notamment grâce à une étape industrielle ayant reçu des crédits pour la substitution énergétique. L'étape agricole est toujours la phase qui émet le plus de GES quelle que soit la méthode utilisée.

6.3.12. ETBE

Etape étudiée	ETBE
Procédés modélisés	Procédé moyen France, calculé à partir des procédés chimiques (3/4) et raffinage (1/4)
Origine des données	Les opérateurs des sites (LYONDELLBASELL et TOTAL)
Validité des données	Données 2008 représentatives d'un fonctionnement moyen, et scénario prospectif 2014

Une partie plus spécifique est dédiée aux résultats des incorporations sous forme d'ETBE. Soulignons tout d'abord que les impacts supplémentaires de la production d'ETBE ne dépendent pas de la filière étudiée pour l'éthanol, et que tout ce qui est décrit ici est valable quelque soit l'origine de l'ETBE.

6.3.12.1 Résultats généraux pour les ETBE

Tableau 102 – Comparaison des impacts environnementaux des différents ETBE et de l'essence par MJ d'éthanol incorporé

ETBE, par MJ de d'éthanol	Energie primaire non renouvelable		Emissions de GES		Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	réduction	kg éq. de CO ₂ / MJ	réduction	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,22		9,01E-02		2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
ETBE, betterave	0,976	20%	5,26E-02	42%	-6,11E-06	3,08E-02	1,86E-04
ETBE, blé	1,00	18%	6,86E-02	24%	-6,16E-06	4,91E-02	4,05E-04
ETBE, maïs	0,958	22%	6,21E-02	31%	-6,42E-06	3,93E-02	3,73E-04
ETBE, canne à sucre	0,561	54%	4,75E-02	47%	1,42E-04	3,33E-02	2,10E-04

Il est important de souligner que ces estimations sont basées sur l'attribution à l'éthanol de l'ensemble des impacts supplémentaires générés par ce carburant par rapport au carburant fossile de référence, que ce soit le différentiel de fabrication des intrants fossiles ou les charges énergétiques et émissions de la réaction de fabrication de l'ETBE.

Un second tableau permet de synthétiser les impacts de cette étape par MJ d'éthanol. L'utilisation via un ETBE ajoute une consommation d'énergie non renouvelable non négligeable de 0,37 MJf/MJ aux filières biocarburant identique à toutes les filières. Cette étape incluse, les gains sont réduits les à 20-25% pour les filières d'éthanol dont la matière première est cultivée sur l'hexagone.

En matière de changement climatique, son impact est de 22 g.eCO₂/MJ supplémentaire.

Ces effets sur les trois autres indicateurs sont moins marquants dans le poids global de ces indicateurs. Mais il est intéressant de souligner une légère baisse sur ces trois indicateurs (voir chapitre analyse).

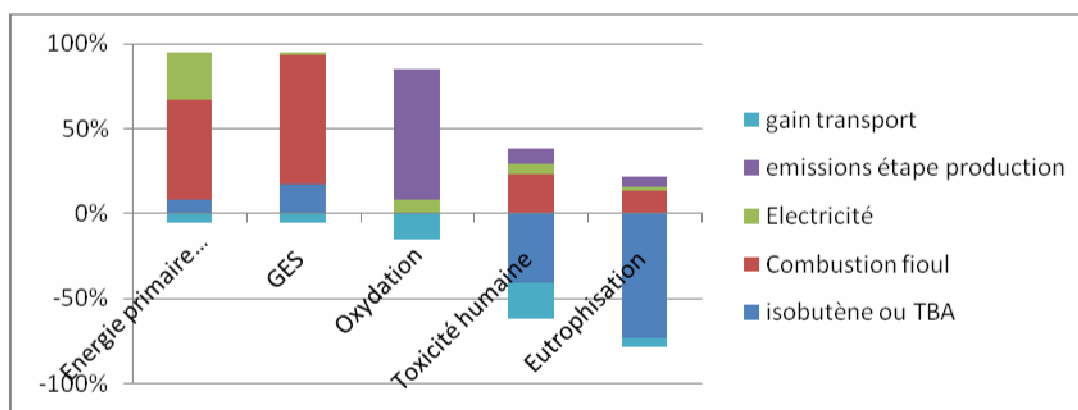
Les efforts énergétiques prévus à échéance de 5 ans devraient permettre de gagner environ 6% sur l'énergie non renouvelable consommée et sur les GES émis par cette étape.

Tableau 103 – Résultats généraux de l'étape ETBE, par MJ d'éthanol

ETAPE ETBE	Energie primaire non renouvelable	GES	Oxydation	Toxicité humaine	Eutrophisation
Par MJ d'éthanol	(MJf/MJ)	(kg eq CO ₂ /MJ)	(kg eq C ₂ H ₄ /MJ)	(kg eq 1,4-DB /MJ)	(kg eq PO ₄ ³⁻ /MJ)
MOYENNE, ACTUEL	0,376	2,17E-02	-2,04E-07	-2,56E-03	-1,12E-05
MOYENNE, PROSPECTIF	0,354	2,05E-02	-3,15E-07	-2,71E-03	-1,14E-05
progression	-6%	-6%	++	+	+

6.3.12.2 Analyse de ces résultats

Figure 56 – Détail par contributeurs des impacts de l'étape ETBE



La figure ci-dessus détaille les postes contributeurs pour ces indicateurs. Quelques explications sont données ci-dessous pour aider sa lecture:

- ▶ Le poste « isobutène ou TBA » regroupe les charges afférentes à la mise en œuvre de ces molécules dans le carburant. Avec des résultats présentés par MJ de biocarburant dans l'ETBE, ce poste est en fait la comparaison de ce qu'a rajouté le fait d'utiliser l'isobutène plutôt qu'une quantité équivalente d'essence sur les cinq indicateurs. L'énergie matière de l'essence remplacée par l'isobutène est donc déduite à ce stade.
- ▶ Le poste « émission étape de production » est constitué des émissions d'autres polluants issues du registre des polluants.
- ▶ « combustion fioul » et « électricité » détaillent l'énergie mobilisée pour l'étape de production de l'ETBE uniquement. Cette énergie a été allouée et rapportée entièrement à l'éthanol contenu dans l'ETBE.
- ▶ Le poste « gain transport » regroupe l'écart du transport spécifique de l'éthanol incorporé sous forme d'ETBE par rapport au transport moyen de commercialisation de

l'éthanol. Cet écart est négatif du fait d'une moindre utilisation de transports par camion pour cette voie ETBE.

Cette figure montre que la contribution baissière obtenue sur les deux derniers impacts du tableau précédent est le résultat des gains qu'apporte le TBA par rapport à l'équivalent fossile lors de sa phase de production. Ces gains s'expliquent par le fait qu'un des produits clé de fabrication du TBA, le butane, ne demande pas de passage en raffinerie, étape émettrice de différents polluants. Cet effet compense la charge polluante légèrement plus forte allouée à l'isobutène et au propène de raffinerie du fait de consommation d'énergie et d'émission de GES plus élevés que celle de l'essence (voire partie inventaires des raffineries et règles d'allocation). Les combustions supplémentaires ainsi que les émissions de divers autres polluants des sites industriels (« émissions étape production ») compensent plus ou moins partiellement ces effets bénéfiques sur ces indicateurs.

En matière de consommation d'énergie non renouvelable, il est important de noter que le léger surcoût¹⁴ en terme d'énergie non renouvelable pour la production des intrants fossiles, i.e. de l'isobutène, du propène et du butane par rapport à la référence essence est marginal au regard de la dépense énergétique de la réaction de formation de l'ETBE. Cette dernière est l'élément principal des consommations d'énergie, avec une part liée à l'électricité mobilisée non négligeable. De même, la réaction de synthèse de l'ETBE est la principale cause des émissions des GES à travers la production de chaleur par combustion.

Il est important de souligner que ces estimations sont basées sur l'attribution à l'éthanol de l'ensemble des impacts supplémentaires générés par ce carburant par rapport au carburant fossile de référence, que ce soit le différentiel de fabrication des intrants fossiles ou les charges énergétiques et émissions de la réaction de fabrication de l'ETBE.

➤ Comparaison avec d'autres études et d'autres méthodologies

Le tableau ci-dessous montre l'existence d'un écart global de 17% concernant la consommation d'énergie entre cette étude et l'étude ADEME-DIREM de 2002. L'écart des gains par rapport à l'essence est moindre et se situe à 11% entre les deux études. La part de chaque poste est relativement stable, la part étape de fabrication de l'ETBE augmentant légèrement. Les explications de ces écarts sont données dans la partie analyse pour les éléments génériques (les inventaires utilisés ECOINVENT sont plus énergivores). Les autres raisons à ces écarts se trouvent dans une revalorisation de l'énergie de la réaction de production de l'ETBE suite à un nouveau calcul d'allocation par TOTAL et la prise en compte de la voie LyondellBasell sur la base d'inventaires ECOINVENT aussi. Les écarts sur l'éthanol contribuent aussi à cet écart global.

Tableau 104 – comparaison avec l'étude ADEME-DIREM, résultat par MJ d'ETBE

Consommation d'énergie non renouvelable (MJf/MJ ETBE)	Total	Ethanol	Isobutène	Fabrication ETBE	gain transport
BIO 2009	1,1E	19%	72%	10%	-1%
ADEME DIREM	0,98	18%	75%	7%	0%
% BIO / DIREM	117%	105%	96%	137%	

¹⁴ car il est important de rappeler que n'apparaît ici que le surcoût en énergie non renouvelable.

7. ANALYSE DES RESULTATS

Nous présentons dans ce chapitre, indicateur par indicateur, les conclusions principales qui nous paraissent pouvoir être tirées de ces résultats. Une analyse plus détaillée des postes impactant les bilans et des points de sensibilité de ces derniers a été conduite.

Une analyse plus détaillée est proposée pour les catégories d'impacts « eutrophisation », « toxicité » et « oxydation photochimique », moins couramment analysés par d'autres études. Une grande vigilance est de mise pour ces indicateurs plus complexes et de fait moins robustes que les deux précédents. Le nombre d'hypothèses conduisant à ce résultat augmente en effet par le choix du modèle de caractérisation choisi (ici CML) et par les modèles d'émissions des substances contribuant à ces indicateurs, qui intègre un nombre important de valeurs par défaut pour calculer les équivalences entre molécules. Ces valeurs sont à prendre comme des ordres de grandeurs et à manipuler avec précautions, d'où une extrême prudence à prendre dans la présentation de conclusions à en tirer.

7.1.1. SUR LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE NON RENOUVELABLE :

7.1.1.1 Conclusions principales pouvant être tirées

Les biocarburants permettent des réductions de consommation d'énergie non renouvelable pouvant aller de 50% pour les filières éthanol en incorporation directe à 65% en moyenne pour les filières oléagineuses. L'incorporation d'éthanol sous forme d'ETBE réduit le gain de ces filières. Ces réductions peuvent même dépasser les 80% pour les filières valorisant des déchets, pour l'huile végétale pure et pour l'éthanol de canne à sucre.

Pour cette dernière filière, ce résultat est cependant atteint avec une hypothèse forte de substitution du gaz naturel par l'énergie contenue dans la biomasse non utilisée directement à cette production. La prise en compte ou non de l'impact du séchage des drèches de maïs, de blé, ou de betterave, ou une éventuelle modélisation différente de ces coproduits (utilisation via de la méthanisation) influence en partie ce résultat. A l'exception de ces deux paramètres, les ordres de grandeur donnés par ces valeurs sont relativement robustes du fait d'une quantification précise de cet indicateur énergie.

7.1.1.2 Analyse des postes contributeurs

Alors que la consommation d'énergie non renouvelable a principalement lieu lors de l'étape d'utilisation par le véhicule pour le carburant fossile, c'est l'étape de transformation industrielle qui représente environ 60 à 70% des consommations en moyenne pour les biocarburants. Le poste énergie est le poste principal de cette étape, avec 70 à 80% de cette étape mobilisés à travers le gaz naturel et 20-25% par l'électricité. Cela reste vrai avec une incorporation sous forme d'ETBE. Ces valeurs sont moindres pour les filières esters, pour lesquelles le poste méthanol pèse plus lourdement (35% des consommations de cette étape industrielle pour l'EMHV de colza par exemple) ainsi que le méthylate de sodium (autour de 15%).

Le reste se répartit globalement entre l'étape agricole (15 à 25% du total) et les transports (10% du total). Pour la première, les engrais représentent entre 50 et 60% des consommations d'énergie non renouvelable de cette étape, la mécanisation venant en second avec 20-25%. Le séchage peut représenter une part non négligeable de cette étape le cas échéant (15% pour le maïs).

Pour les filières à partir de déchets (EMGA et EMHAU), l'étape amont de transport ne pèse quasiment pas dans le bilan. C'est donc l'étape de transformation qui ressort comme étape largement majoritaire et qui explique les niveaux réduits de consommation d'énergie. Notons toutefois que la partie de transformation des sous-produits animaux en graisse, si elle devait être intégrée aux produits aval comme le biocarburant, pourrait peser aussi lourd qu'une culture végétale.

7.1.2. SUR LE POTENTIEL D'ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE :

7.1.2.1 Conclusions principales pouvant être tirées

Sans tenir compte du changement d'affectation des sols, les biocarburants offrent des réductions réelles de gaz à effet de serre. **Sans même tenir compte d'aucune allocation, toutes les filières en incorporation directe sont a minima à -30 à -40% par rapport aux filières fossiles de référence.** Une fois alloués les impacts aux coproduits, ces réductions atteignent entre 50 à 70% pour les filières végétales hexagonales, et dépassent les 90% pour les biodiesels d'huiles usagées et graisses animales. Les filières d'importation ou les filières de recyclage, par les économies d'énergie non renouvelable de certains de leurs coproduits, présentent des niveaux gains très intéressants.

L'incorporation sous forme d'ETBE vient diminuer ces gains sur les filières éthanol d'environ 20 points, conduisant à des réductions d'émissions de GES allant de 24% (blé) à 47% (betterave, canne à sucre) par rapport à celles de la filière fossile de référence.

Il faut cependant noter que **les scénarii de changements directs d'affectation des sols (CAS)** peuvent, pour les plus extrêmes d'entre eux, conduire à renverser cette tendance pour le soja, la palme et la canne à sucre. Ce renversement de tendance peut aussi exister pour ces mêmes scénarii pour les CAS indirects pour les filières françaises. Des scénarii plus modérés montrent cependant que les bilans étudiés peuvent rester favorables aux filières biocarburants. Un chapitre ultérieur synthétisera les impacts possibles de ces changements indirects d'usage des sols.

Les niveaux exacts de réduction atteints sont davantage liés aux choix de modélisation pour l'indicateur « émissions de GES » que pour l'indicateur « énergie non renouvelable ». Les raisons des difficultés d'une quantification fine s'expliquent par l'absence de robustesse sur un paramètre aussi important que N₂O et par la prise en compte d'un effet véhicule pour l'éthanol qui en allouant toute réduction même infime des émissions totales lors de la combustion (-1mg de CO₂/km) au biocarburant, impacte de manière non négligeable le résultat par MJ de biocarburant.

Moyennant ces limites et étant donné la modélisation se situant plutôt dans le haut de la fourchette des émissions de protoxyde d'azote, ce travail confirme les gains en termes de changement climatique de ces filières si aucun changement d'affectation des sols ne devait être pris en compte.

Les prudentes évolutions prospectives modélisées présentent des améliorations des bilans, permettant aux filières ETBE de se situer autour de 40% de réduction pour le blé et le maïs, et à

l'ensemble des autres filières de dépasser les 60% de réductions vis-à-vis des émissions des filières fossiles de référence.

Figure 57 –Emissions de Gaz à Effet de Serre du « champ à la roue » sans changement d'affectation des sols : valeurs ramenées à l'éthanol, lorsque incorporé directement ou sous forme d'ETBE dans un E10

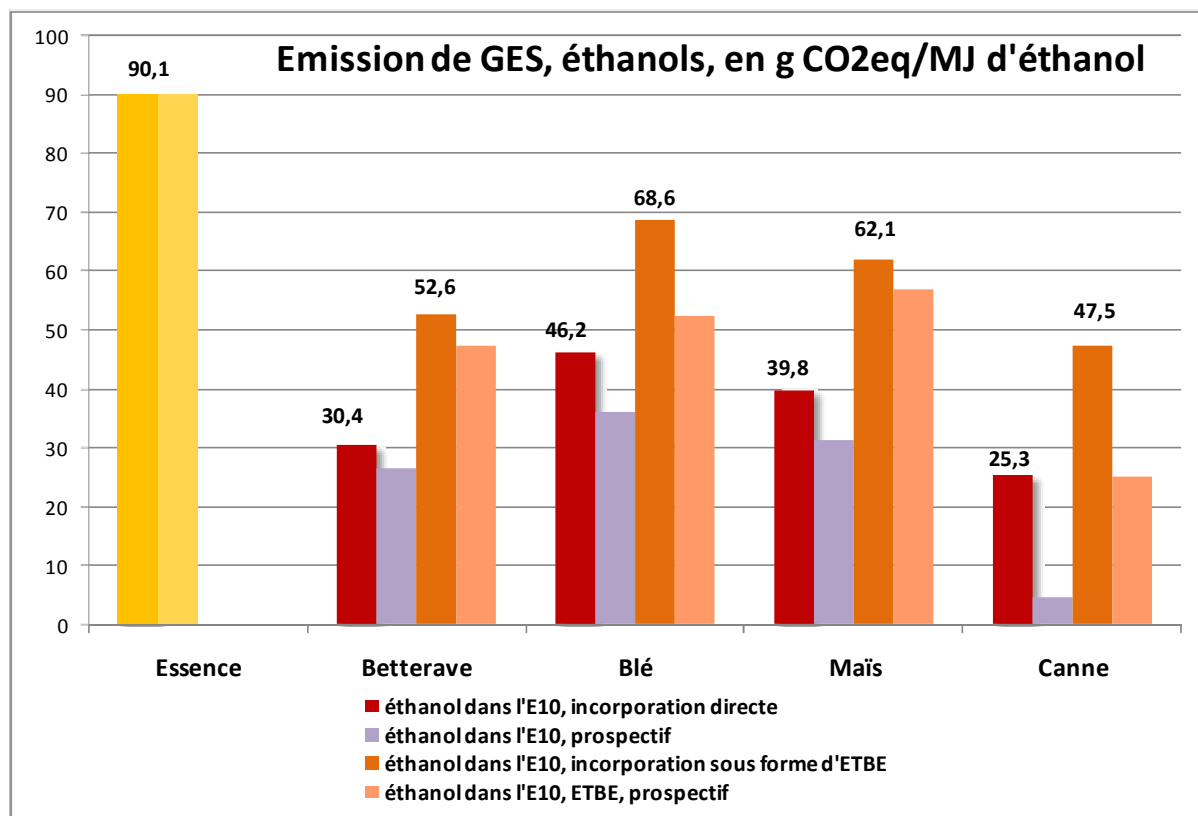
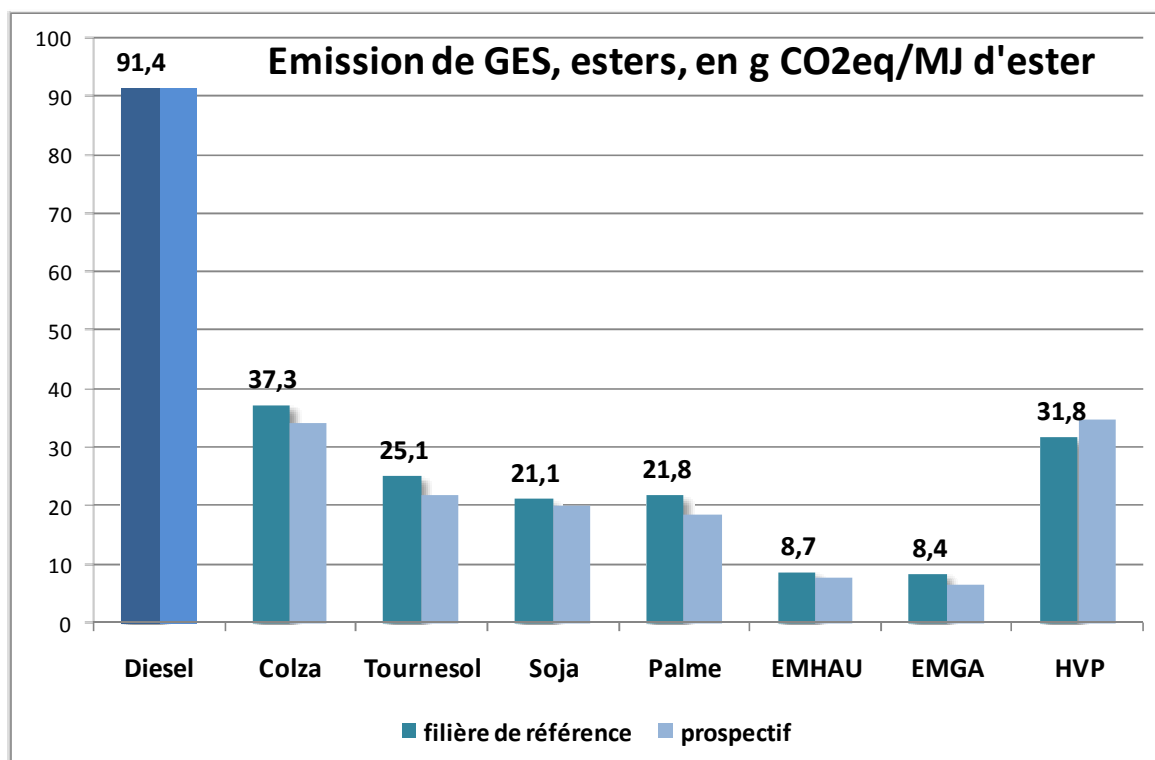


Figure 58 - Emissions de Gaz à Effet de Serre « champ à la roue » sans changement d'affectation des sols : filières esters, incorporées dans des B10



7.1.2.2 Analyse des postes contributeurs

En termes de postes fortement émetteurs, deux types de bilans se dessinent:

- ▶ Les bilans des filières huiles agricoles, pour lesquelles la partie la plus émettrice est l'étape agricole : entre 50% (palme) et 75% (colza) des émissions du total du cycle de vie. Ces émissions sont dues principalement à la fabrication des engrais et aux émissions de protoxyde d'azote N_2O des sols. L'étape de transformation compte pour environ 20 à 25% du bilan avec les émissions liées à l'énergie et à la fabrication du méthanol et du méthylate de sodium. Les transports ont bien entendu une part variable de contribution à cet impact, avec 5% environ pour une culture sur le territoire national et 20-25% en cas d'importation depuis des pays hors UE.
- ▶ Les bilans des éthanol sont plus marqués par l'étape industrielle, dont la contribution peut aller de 35% pour le blé à 65% pour la betterave. Cela est dû à un procédé industriel plus gourmand en énergie et dans le cas de la betterave, à des émissions agricoles à l'hectare réparties sur une quantité plus importante de biocarburant, baissant ainsi cette étape proportionnellement aux autres. Ces bilans bénéficieraient en revanche d'un impact favorable lié à l'effet combustion, venant baisser la somme des émissions totales (effet à confirmer : voir le tableau 34 sur ce sujet). Le bilan de la canne à sucre présente de plus une étape industrielle négative, en raison de crédits de substitution attribués aux coproduits valorisable sous forme d'énergie. Comme pour la partie énergie non renouvelable, l'hypothèse forte d'une substitution de cette énergie à du gaz naturel est à garder à l'esprit en utilisant ces données.

L'incorporation sous forme d'ETBE ajoute environ 24 g eCO_2 /MJ d'éthanol produit. Cette étape est ainsi souvent le second poste d'émission. Le calcul ici réalisé fait porter entièrement la dépense

énergétique et les émissions de GES afférentes de la réaction d'ETBE à l'éthanol. Sa faible part en énergie dans l'ETBE final (l'éthanol a une part PCI dans l'ETBE de 35%) accentue ces dépenses. Les émissions liées à la fabrication de vapeur sont les sources principales d'émissions de GES de cette étape.

Le protoxyde d'azote émis par les sols est l'un des éléments majeurs d'émission de GES pour les biocarburants. Il compte pour 20% du bilan de l'éthanol de betterave, 30% pour celui du blé, et 40% pour celui du colza. Or l'incertitude sur ce paramètre est très grande. Les mesures en plein champ sont complexes et peu nombreuses. Elles présentent une grande variabilité, les facteurs extérieurs tels que les sols, le climat, jouent un rôle important, et les émissions indirectes sont difficiles à estimer alors qu'elles ont un rôle non marginal. Cette incertitude se traduit dans la variabilité des quelques mesures et modèles disponibles, et donc dans les paramètres à utiliser. Comme expliqué dans la partie méthodologie, la présente étude s'est appuyée sur une approche Tier 2 du GIEC, en proposant des valeurs France pour les résidus de culture et le lessivage. Deux autres possibilités de quantification du N₂O émis ont été calculées afin de donner une idée de cette variabilité et de son impact dans le résultat. De cette analyse de sensibilité sur ce paramètre, il ressort que 4 filières présentent des variations importantes entre ces calculs. Un rappel des niveaux d'émission estimé par hectare selon les trois approches calculées est donné ci-dessous. **Cette limite complique l'utilisation des valeurs absolues et la comparabilité des études existantes.**

Tableau 105 – rappel sur les variabilités du N₂O

Kg N dans N ₂ O/ha	Blé	Betterave	Colza	Canne à sucre
Cette étude (méthode GIEC avec 2 valeurs adaptées)	2,7	2,8	2,9	1,7
Estimation type JEC ¹⁵	1,9	2,3	2,7	3,8
Estimation selon la méthode GIEC, avec utilisation des valeurs par défaut	3,3	4,1	3,7	2,3

¹⁵ Le terme « type JEC » renvoie au fait que les données utilisées ont été adaptées à partir des émissions données dans les tableaux des résultats de l'étude JEC, en les ramenant à un kg de N apporté, afin d'intégrer des écarts de fertilisation entre études.

7.1.3. SUR LES EMISSIONS IMPACTANT L'INDICATEUR POTENTIEL DE « TOXICITE HUMAINE »

Cet indicateur présente une contribution prépondérante des émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, qui masque les autres écarts. Ce paramètre mis à part, l'utilisation de produits phytosanitaires est l'élément majeur qui pénalise les filières biocarburants par rapport aux filières fossiles. Sans ce dernier, les niveaux seraient comparables. Mais cet écart (après retraitement de l'impact HAP) n'est pas assez prononcé pour prétendre ne pas dépendre de la modélisation choisie, et notamment des facteurs de toxicité issus de CML.

7.1.3.1 Filières fossiles

Les molécules impactant cet indicateur sont décrites ci-dessous pour un véhicule parcourant un km en utilisant de l'essence sans biocarburant. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont dominants dans le potentiel de toxicité du transport. Cette prépondérance est due à un facteur de caractérisation (donc à un niveau de toxicité) calculé dans CML équivalent à 572 400 kg de 1,4 DichloroBenzène, soit l'un des plus forts avec la dioxine. Mise à part cette émission « écrasant » toutes les autres, les émissions de différents éléments traces métalliques lors de l'extraction et du raffinage, ainsi du benzène, sont les principaux polluants contribuant à l'indicateur. L'étape véhicule contribue aussi légèrement à l'indicateur via les oxydes nitreux et les particules pour diesel.

Tableau 106 – Potentiel d'émissions toxiques par MJ pour une essence de référence

Essence E0	kg eq 1,4-DB / MJ de biocarburant	Etape extraction	Etape raffinage	Etape transport	Etape combustion
Total	2,05E-02	30%	6%	1%	64%
PAH	1,57E-02	15%	2%	0%	83%
Barium	1,14E-03	96%	4%	0%	0%
Barite	1,72E-03	91%	8%	1%	0%
Nickel	7,05E-04	40%	58%	1%	0%
Benzène	4,09E-04	52%	47%	1%	0%
Arsenic	1,72E-04	69%	19%	13%	0%
Chrome VI	1,16E-04	75%	4%	21%	0%
Nox	1,30E-04	66%	20%	4%	10%

Tableau 107 – Potentiel d'émissions toxiques par MJ pour un diesel de référence

Diesel B0	kg eq 1,4-DB / MJ de biocarburant	Etape extraction	Etape raffinage	Etape combustion	Etape combustion
TOTAL	4,12E-01	1%	0%	0%	98%
HAP	4,07E-01	1%	0%	0%	99%
Barite	1,75E-03	89%	10%	0%	0%
Baryum	1,15E-03	95%	5%	0%	0%
Nickel	8,38E-04	34%	65%	1%	0%
Benzène	4,71E-04	45%	54%	1%	0%
NOx	2,42E-04	19%	7%	1%	73%
Particules, > 2.5 µm, et < 10µm	6,11E-06	15%	23%	3%	59%

7.1.3.2 Biocarburants

Cette partie détaille et analyse les contributions de l'indicateur potentiel de toxicité humaine pour les filières biocarburants. Elle se décline en quatre étapes. La première rappelle le niveau de quelques filières sur cet indicateur, ainsi que la part de chaque étape dans cette valeur. Une seconde offre un regard sur la contribution des postes principaux (i.e. d'intrants ou de sortants). Une troisième étape entre dans le détail des principaux flux contribuant à ces résultats. Enfin, une analyse de sensibilité sur les pesticides et les éléments traces est conduite pour appréhender le niveau de précision de la quantification proposée.

- Rappel des valeurs de cet indicateur pour quelques filières biocarburant.

Tableau 108 – Niveaux d'émissions et étapes contributrices pour deux filières EMHV en terme de potentiel de toxicité humaine

	Colza		Soja	
	kg eq 1,4-DB / MJ de biocarburant	% du total positif et % du total négatif	kg eq 1,4-DB / MJ de biocarburant	% du total positif et % du total négatif
TOTAL	-6,48E-01		-6,53E-01	
Phase agricole	3,1E-02	93%	2,5E-02	88%
Phase industrielle	1,9E-03	6%	1,2E-03	5%
Phase transport	5,0E-04	1%	2,2E-03	8%
Phase véhicule	-6,8E-01	-100%	-6,8E-01	-100%

Tableau 109 - Niveaux d'émissions et étapes contributrices pour deux filières éthanol et une ETBE en terme de potentiel de toxicité humaine

	E10 de Blé		E10 de Betterave		E10, ETBE de Blé	
	kg eq 1,4-DB / MJ d'éthanol	% du total	kg eq 1,4-DB / MJ d'éthanol	% du total	kg eq 1,4-DB / MJ d'éthanol	% du total positif, et % du total négatif
TOTAL	5,11E-02		3,31E-02		4,91E-02	
Phase agricole	3,44E-02	67%	1,6E-02	48%	3,5E-02	68%

	E10 de Blé		E10 de Betterave		E10, ETBE de Blé	
Phase industrielle	2,93E-03	6%	3,2E-03	10%	3,0E-03	6%
Phase transport	7,79E-04	2%	1,0E-03	3%	7,9E-04	2%
Phase ETBE					-2,6E-03	-100%
Phase véhicule	1,3E-02	25%	1,3E-02	39%	1,3E-02	25%

Les niveaux et les répartitions diffèrent entre filières esters et éthanols.

Pour les esters, la phase véhicule a une contribution prépondérante et présente une valeur négative. La phase agricole vient ensuite, estimée vingt fois plus faible que les gains de la phase véhicule. L'étape industrielle suit et en dernier vient la phase de transport. Cependant pour le soja, cette dernière apparaît contribuer à un niveau équivalent avec l'étape de transformation.

Pour les éthanols, l'indicateur présente un niveau positif légèrement supérieur à celui de l'essence fossile de référence (deux fois supérieur pour le blé, et 50% plus fort pour la betterave). L'étape agricole en est le contributeur principal, suivi à un niveau proche par la phase véhicule.

Lorsque incorporés **sous forme d'ETBE, le bilan des éthanols présente une amélioration sur cet indicateur**. La phase ETBE est négative, signe que l'effet des MJ fossiles mélangés à l'éthanol pour former de l'ETBE est plus favorable que les MJ d'essence E0 qu'ils remplacent. Cela se confirme lorsqu'on analyse les inventaires utilisés pour ces calculs. Les émissions de l'étape industrielle de fabrication de l'ETBE, notamment pour l'ETBE voie LYONDELL, fortement majoritaire, sont plus faibles que les émissions imputées au MJ d'essence. Le tableau ci-dessous est un extrait de l'annexe 4 illustrant cet élément. On pourra aussi noter un très léger écart pour les étapes amont à l'éthanol entre les valeurs pour l'éthanol de blé incorporé pur et celle de l'éthanol incorporé sous forme d'ETBE. Cela est lié à un très léger écart de rendement entre le MJ d'éthanol pur et le MJ d'éthanol incorporé sous forme d'ETBE).

Tableau 110 – rappel de l'annexe 4 : inventaires d'impact de l'étape raffinerie

Intrant	Oxydation photo-chimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	kg eq. C ₂ H ₄ / kg	kg eq. 1,4 DB / kg	kg eq. PO ₄ ³⁻ / kg
Emission Raffinerie Essence	1,05E-04	3,58E-02	5,04E-05
Emission LyondellBasell étape ETBE	1,50E-05	5,27E-08	0,00E+00
Emission Raffinerie étape ETBE	7,49E-05	2,55E-02	3,60E-05

Sources : calculs BIO à partir des données iREP

▪ **Postes contributeurs**

Les deux tableaux suivants détaillent les phases véhicule et agricole, phases les plus contributrices sur cet indicateur. Seuls les filières colza et blé sont présentées. On retrouve globalement les mêmes intrants contributeurs et ordres de grandeurs dans le cas des autres filières.

Tableau 111 – détail des postes contributeurs de l'étape agricole : filière EMHV de Colza

Colza	kg eq 1,4-DB / MJ biocarburant	% dans le total de l'étape
Total étape agricole	3,18E-02	100%
Apports éléments traces	3,9E-03	12%
Fabrication des engrais azotés minéraux	4,5E-03	14%
Impacts des pesticides	2,1E-02	65%

L'apport de pesticides est le poste le plus contributeur de cette étape, avec une contribution cinq fois plus importante que les postes suivants (fabrication des engrais azotés et apports d'éléments traces contenus dans ces engrais). Malgré les incertitudes sur les niveaux exacts de ces potentiels, résultant de la modélisation des apports d'éléments traces et des pesticides (voir partie modélisation) et des limites de quantification du rôle des pesticides sur la toxicité humaine, cette hiérarchie semble cohérente par rapport à l'appréhension générale qui peut être faite des risques respectifs.

Tableau 112 – Détails de la phase véhicule, filières colza et blé

valeurs pour l'étape véhicule	Colza			Blé		
	kg eq 1,4-DB / MJ EMHV	part dans le total	kg du flux considéré / MJ EMHV	kg eq 1,4-DB / MJ d'éthanol	part dans le total	kg du flux considéré / MJ d'éthanol
Total étape véhicule	-6,8E-01	0%		1,3E-02	100%	
HAP	-6,8E-01	100%	-1,19E-06	1,3E-02	100%	2,27E-08
NOx	2,3E-04	0%	1,94E-04	6,0E-06	0%	5,00E-06
Particules<2,5 µm	-2,7E-07	0%	-3,30E-07	0	0%	0
Particules>2,5 µm	-2,7E-07	0%	-3,30E-07	0	0%	0
COV NM	0	0%	2,12E-06	0	0%	-1,84E-05
SOx	0	0%	0	0	0%	0
CO	0	0%	1,18E-05	0	0%	-5,50E-04
Vapeurs d'éthanol	2,3E-04	0%	0	0	0%	1,99E-05
Vapeurs d'acétaldéhyde	-6,8E-01	0%	0	1,3E-02	100%	5,35E-07
<i>TOTAL des flux listés positifs</i>	-6,8E-01	100%		1,3E-02	0%	

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques apparaissent très fortement comme premier facteur contributeur pour le potentiel de toxicité humaine lors de la combustion moteur, et ce malgré des flux très faibles (µg / MJ de biocarburant pour les esters). Les oxydes nitreux suivent ensuite et les particules pour les diesels. Il est important de noter les limites de cette modélisation sur cet indicateur :

- on voit que des molécules comme les COVNM, les vapeurs d'éthanol ou l'acétaldéhyde n'entrent pas dans ce calcul d'impact potentiel alors que leurs flux ne sont pas nuls, pour la simple raison que la base de modélisation CML ne présente pas de facteurs d'impact pour ces molécules. Or ces molécules sont suspectées d'avoir une potentielle contribution sur cet indicateur.
- Les particules, aujourd'hui suspectées de présenter des risques non négligeables sur la santé humaine, sont affectées d'un facteur d'impact de 1 kg 1,4-DB sous CML, ce qui est relativement bas.

La valeur négative calculée pour les filières esters résulte du fait qu'en modifiant les niveaux des émissions véhicule, l'incorporation d'esters réduit les potentiels toxiques des émissions de l'ensemble du carburant (d'où la valeur négative, la réduction étant plus que proportionnelle par rapport au pourcentage d'incorporation).

▪ Détail des principaux flux

Tableau 113 – liste des molécules principales contribuant à cet indicateur : exemple de l'EMHV de colza

Colza	kg eq 1,4-DB / MJ biocarburant	part dans le total des contributions positives ou négative (chiffre <0)	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
Total	-6,5E-01		3,2E-02	1,4E-03	5,0E-04	-6,8E-01	
HAP	-6,8E-01	-100%	0%	0%	0%	100%	émissions véhicule pour quasiment 100% de l'impact
matière active moyenne des pesticides	2,0E-02	65%	100%	0%	0%	0%	apports de pesticides
Chrome VI	1,6E-03	5%	88%	9%	2%	0%	éléments traces des apports d'engrais
Nickel	2,5E-03	8%	96%	2%	2%	0%	éléments traces des apports d'engrais
Arsenic	1,0E-03	3%	84%	11%	5%	0%	fabrication des engrais (73%); fabrication des intrants industriels (16%), notamment méthylate ;
Plomb	3,0E-04	1%	100%	0%	0%	0%	éléments traces des apports d'engrais
Barite	5,7E-04	2%	53%	41%	5%	0%	éléments traces des apports d'engrais
Zinc	1,5E-04	0%	100%	0%	0%	0%	éléments traces des apports d'engrais
<i>TOTAL des flux listés positifs</i>	2,6E-02	85%					

Tableau 114 - liste des molécules principales contribuant à cet indicateur : exemple de l'éthanol de blé

blé	kg eq 1,4-DB / MJ biocarburant	part en % dans le total	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
TOTAL	5,1E-02		3,4E-02	2,9E-03	7,8E-04	1,3E-02	
HAP	1,8E-02	34%	15%	9%	1%	74%	émissions véhicule pour quasiment 100% de l'impact
matière active moyenne	2,3E-02	44%	100%	0%	0%	0%	apports de pesticides
Chrome VI	1,7E-03	3%	88%	9%	4%	0%	éléments traces des apports d'engrais
Nickel	2,3E-03	5%	95%	3%	2%	0%	éléments traces des apports d'engrais
Arsenic	1,0E-03	2%	83%	9%	8%	0%	fabrication des engrais (73%); fabrication des intrants industriels (16%), notamment méthylate ;
plomb	2,5E-04	0%	99%	0%	0%	0%	éléments traces des apports d'engrais
barite	9,7E-04	2%	35%	57%	8%	0%	éléments traces des apports d'engrais
zinc	1,3E-04	0%	99%	0%	0%	0%	éléments traces des apports d'engrais
<i>TOTAL des flux listés</i>	4,6E-02	91%					

On s'aperçoit que la réduction d'émission d'hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP) de 25% pour un B10 impacte le plus fortement cet indicateur de potentiel de toxicité. C'est ce poste qui positionne quasiment à lui seul l'écart entre la filière fossile et les filières de biodiesel sur cette catégorie d'impact. L'effet si fort de cette réduction est dû à un facteur de caractérisation calculé dans CML comme vu précédemment. A titre de comparaison, le facteur CML utilisé pour représenter la toxicité moyenne des matières actives phytosanitaires « n'est que » de 56 kg de 1,4 DichloroBenzène.

Pour les éthanol, la phase véhicule est une nouvelle fois importante. Notons cette fois-ci la valeur positive attribuée à cette dernière pour les éthanol. En effet, en ne réduisant pas les émissions de HAP dans un E10 (contrairement à l'E85), l'éthanol en E10 contribue donc aussi à ces émissions et porte une valeur identique à celle du carburant fossile du mélange. Les émissions de HAP de l'étape d'extraction de l'essence fossile ne sont pas portées par l'éthanol, ce qui lui donne un léger avantage sur ce poste fortement contributeur. L'E85, en réduisant le niveau d'émission de HAP du mélange, présente quant à lui un bilan plus favorable sur cet indicateur (voir paragraphe 6.5 sur le niveau de mélange). Mais pour les éthanol, l'impact des émissions de HAP joue à niveau équivalent avec l'impact des phytosanitaires.

Sur cette étape, il est nécessaire de rappeler les hypothèses fortes de modélisation qui ont été ici utilisées devant les difficultés à modéliser finement le devenir et l'impact des produits phytosanitaires et des éléments traces métalliques. Le fait de les retrouver en tant que premiers contributeurs potentiels de l'étape agricole questionne le choix des hypothèses sous-jacentes et limite la comparabilité entre filières à minima.

- **Analyse de sensibilité : Produits phytosanitaires, apports d'éléments traces et facteur de risque HAP**

Au regard des résultats détaillés dans le chapitre d'analyse sur les indicateurs de potentiel de toxicité humaine, il apparaît sans surprise que le poste « pesticides » est un des postes majeurs du potentiel global de toxicité des bilans présentés dans cette étude. De même mais de manière moins intuitive, les éléments traces apportés via les intrants agricoles jouent un rôle très significatif dans les bilans dressés ici. Devant eux cependant, les émissions de HAP viennent écraser cet indicateur pour les esters. Leur facteur d'impact jugé des plus élevés par le modèle CML en est la cause principale.

Le tableau suivant synthétise quelques analyses de sensibilité conduites sur ces paramètres. On s'aperçoit que l'hypothèse d'avoir choisi les valeurs du Carbofuran comme matière active représentative place le résultat dans une fourchette haute au niveau de ce paramètre. La modélisation des éléments traces est de moindre importance vu un impact plus faible dans le bilan global. Avec les seconds polluants après les HAP de l'ordre de E-03 kg 1,4 DB eq / MJ pour les filières fossiles, les impacts des produits phytosanitaires placeraient malgré tout les biocarburants comme ayant un impact potentiel sur la toxicité humaine plus important que les filières fossiles, sans cet effet HAP. Le niveau de l'écart entre filières est cependant sujet à caution.

Notons pour être complet que le premier test réalisé dans le tableau ci-dessous donne une idée de ce qui se passerait aussi si les émissions vers l'air et l'eau avaient été surestimées. Il illustre ainsi le poids relativement restreint dans le résultat des phytosanitaires émis vers l'air et l'eau. Le test réalisé montre qu'après avoir réduit les HAP à un facteur de caractérisation de 1000, la simulation d'une prise en compte des bandes enherbées (facteur de réduction de ce niveau d'émission) aurait impacté de moins de 0,1% cette valeur globale retravaillée, du fait d'un facteur de caractérisation CML dans l'eau assez faible (56 kg 1,4-DB eq pour l'eau de surface, contre 186 pour l'air et 1432 pour le sol agricole respectivement).

Tableau 115 Analyse de sensibilité sur un éthanol de blé, valeur par MJ d'éthanol : Produits phytosanitaires et éléments traces

			% par rapport à la valeur de référence éthanol
kg eq 1,4-DB	TOTAL	Etape agricole	
Référence éthanol de blé	5,11E-02	3,44E-02	
Référence fossile	2,05E-02	/	-60%
Variation sur les produits phytosanitaires			
Si la quantité de pesticide vers l'eau et l'air est multipliée par 2	5,18E-02	3,50E-02	1%
Quantité de pesticide vers le sol divisé par 2	3,99E-02	2,31E-02	-22%
Si valeur CML du pesticide moyen = moyenne des valeurs de CML pour les pesticides	4,34E-02	2,66E-02	-15%

kg eq 1,4-DB	TOTAL	Etape agricole	% par rapport à la valeur de référence éthanol
si valeur CML du pesticide moyen = celle de l' Isoproturon	4,36E-02	2,69E-02	-15%
si valeur CML du pesticide moyen = 10 fois celle du Carbofuran	2,59E-01	2,43E-01	407%
Variation sur les éléments trace			
Eléments traces, si dans sol industriel	4,87E-02	3,20E-02	-5%
Eléments traces, si quantités ioniques divisées par 10	4,82E-02	3,15E-02	-6%

Une seconde analyse a été conduite, visant à estimer l'impact qu'aurait une fluctuation du facteur caractérisant l'impact potentiel toxicité humaine. Elle a consisté à diviser par dix la valeur proposée par CML afin de ramener l'impact des HAP à un niveau plus bas. Le tableau suivant en présente les résultats.

Tableau 116 - Analyse de sensibilité sur un éthanol de blé, valeur par MJ d'éthanol : facteur de risque HAP

kg eq 1,4-DB		TOTAL	Ecart entre essence et éthanol
Référence éthanol de blé	Valeurs de l'étude : Facteur caract. CML des HAP = 572 400	5,11E-02	
Référence fossile	Valeurs de l'étude : Facteur caract. CML des HAP = 572 400	2,05E-02	-60%
Référence éthanol de blé	Si Facteur caract. HAP est divisé par 10	3,51E-02	
Référence fossile	Si Facteur caract. HAP est divisé par 10	6,38E-03	-82%

Ces éléments montrent que cet indicateur est aux limites des possibilités actuelles de modélisation. Deux difficultés majeures doivent être relevées pour pouvoir espérer valoriser correctement un tel impact :

- ▶ Difficulté d'arbitrage entre le besoin d'un modèle homogène d'estimation de l'impact sur la toxicité humaine, et donc d'utiliser des modèles suffisamment larges et consensuels comme ceux développés pour les ACV, et la capacité à avoir un regard critique sur les facteurs de toxicité proposés.
- ▶ Difficulté à modéliser et à quantifier des systèmes complexes tels que le système sols – produits phytosanitaires / éléments trace – humain par un facteur de risque unique et simple.

▪ **Synthèse sur cet indicateur**

Cet indicateur est celui présentant le plus d’incertitude actuellement. Les facteurs de caractérisation sont à améliorer et l’impact fort de postes ayant un niveau de quantification et de modélisation plus restreint doivent rendre précautionneux le lecteur.

Avec ces limites à l’esprit, on peut cependant souligner les tendances que dessine la présente étude. En réduisant les émissions de HAP, les biodiesels semblent présenter un avantage suffisamment intéressant par rapport au carburant fossile pour contrebalancer les effets des apports de phytosanitaires sur le potentiel de toxicité humaine. Cependant, et malgré le facteur 30 qui existe entre impact favorable des HAP et impact défavorable des pesticides, il convient toutefois d’être prudent sur ce constat, les facteurs d’impact des HAP et des pesticides pouvant évoluer avec les connaissances ou le type de modélisation de plusieurs unités. Du côté des éthanol, cet effet n’existe qu’à des taux de mélange assez élevés. De ce fait, ces filières ne bénéficient pas d’un effet compensant les apports de produits phytosanitaires, premier poste majeur différenciant les éthanol des filières fossiles sur cet indicateur. Ceci place ainsi les bilans des éthanol consommés en France à des niveaux plus élevés de potentiel d’impact sur la toxicité humaine que la filière essence française. En revanche, le niveau actuel de connaissances ne semble pas suffisant pour trancher pleinement sur l’importance réelle de cet écart.

L’analyse de sensibilité confirme le besoin de vigilance sur ces constats. L’apport principal de ce travail serait plutôt d’avoir ciblé une des questions à résoudre pour trancher entre filières biocarburants et filières fossiles : « vaut-il mieux émettre des HAP en ville ou des matières actives dans les sols et dans l’eau ? ». Lui apporter une réponse plus définitive demandera des travaux ultérieurs, notamment un travail prioritaire d’amélioration de la connaissance en matière de devenir des produits phytosanitaires et d’impact sur la toxicité. De même un chantier sur l’approfondissement de la connaissance du rôle des HAP émis par les véhicules sur la santé humaine sera nécessaire, mais en gardant à l’esprit **le besoin fort d’avoir une approche homogène permettant de les comparer et de les prioriser.**

Tableau 117 – Quelle importance donner à cet écart ? Exemple de comparaisons directes

	facteur CML	Ethanol de blé	Ethanol de Betterave	
	eq 1,4 DB / kg	kg eq 1,4-DB	kg eq 1,4-DB	unités
différentiel d’émission pour 10 000 km entre E10 et essence		46,3	19,0	kg eq 1,4-DB /10 000 km
Quantité de HAP qui correspond à cette quantité de 1,4 DB	572 400	8,1E-05	3,3E-05	kg HAP
Quantité de Benzène qui correspond à cette quantité de 1,4 DB	1 900	2,4E-02	1,0E-02	kg Benzène
Quantité de Formaldéhyde qui correspond à cette quantité de 1,4 DB	1	46,3	19,0	kg Formaldéhyde

Tableau 118 – Quelle importance donner à cet écart ? Exemple de comparaisons indirectes

à titre comparatif : Sont équivalents à l'écart entre éthanol et essence en terme de potentiel de toxicité humaine :		E10 de blé	E10 de betterave		Données intermédiaires
« l'écart sur l'indicateur de toxicité entre un E10 et un E0 pour parcourir 10 000 kméquivaldrait aux émissions de HAP d'un véhicule diesel EURO 4 de type Clio, sans FAP, roulant au B10 sur ...	90	37	... Km »	0,9 µg / km émis par un B10
« 135 milliards de km parcourus avec l'E10 (distance parcourue en 1 an par les 15 millions de véhicules essence en France)équivaldraient aux émissions de benzène de l'ensemble des raffineries françaises pendant ...	1,4	0,6	.. années de fonctionnement. »	239 470 kg benzène déclarés émis par les raffineries françaises sur l'année 2007 (un véhicule essence parcourt en moyenne 9 000 km /an)

7.1.4. SUR LE POTENTIEL D'ÉMISSIONS PHOTO-OXYDANTES

Cet enjeu environnemental mesure le potentiel d'émission de molécules oxydantes, dont notamment les composés organiques volatiles (COV). Sur cet indicateur, les écarts entre biocarburants et filières fossiles sont variés, puisqu'ils sont en faveur de l'éthanol et en défaveur légère des esters.

7.1.4.1 Filières fossiles

Les trois contributeurs principaux au potentiel d'oxydation photochimique sont les oxydes de soufre, le monoxyde de carbone, et les Composés Organiques volatiles non méthaniques (COVNM), et ce pour les deux filières fossiles. Le méthane pour le diesel, et le toluène pour la filière essence (10% du total) viennent ensuite. Ce dernier point est à relativiser toutefois, les données véhicules étant variables sur ce point. L'étape véhicule est le contributeur principal à travers le monoxyde de carbone et les COVNM pour l'essence. Cela est moins marqué pour le gazole, pour lequel la partie extraction du pétrole brut prend le pas.

Tableau 119 – Potentiel d'émissions photo-oxydantes par MJ pour un diesel de référence

Diesel B0	Kg eq C ₂ H ₄	Etape extraction	Etape raffinage	Etape transport	Etape combustion
Total	1,12E-05	50%	33%	1%	16%
SOx	4,78E-06	93%	6%	1%	0%
COVNM, non spécifié	4,46E-06	3%	62%	1%	33%
CO, fossile	1,24E-06	37%	36%	2%	26%
Méthane, fossile	3,63E-07	81%	18%	1%	0%
Pentane	8,20E-08	91%	5%	4%	0%
Ethane	6,37E-08	32%	67%	1%	0%
Butane	7,02E-08	84%	13%	3%	0%

Tableau 120 – Potentiel d'émissions photo-oxydantes par MJ pour une essence de référence

Essence E0	Kg eq C ₂ H ₄	Etape extraction	Etape raffinage	Etape transport	Etape combustion
Total	2,00E-05	28%	14%	1%	57%
CO, fossile	6,41E-06	7%	5%	0%	87%
COVNM, non spécifié	6,68E-06	2%	31%	1%	66%
SOx	4,72E-06	94%	4%	1%	0%
Toluène	1,17E-06	1%	0%	0%	99%
Méthane, fossile	3,58E-07	82%	14%	1%	2%
Acétaldéhyde	2,92E-07	0%	0%	0%	100%
Pentane	8,12E-08	92%	4%	4%	0%
Butane	6,84E-08	86%	11%	4%	0%

7.1.4.2 Biocarburants

La même analyse que pour l'indicateur potentiel de toxicité humaine est conduite pour l'indicateur potentiel d'oxydation photochimique, avec un rappel des valeurs globales et déclinées par étape, puis analyse des flux contributeurs.

▪ Rappel des valeurs globales et par étape

Tableau 121 – rappel des résultats pour l'indicateur potentiel d'oxydation photochimique : EMHV

Phases	EMHV Colza		EMHV Soja		EMHAU	
	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ de biocarburant	% / total	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ de biocarburant	% / total	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ de biocarburant	% du total positif et % du total négatif
TOTAL	1,50E-05	100%	1,22E-05	100%	4,69E-06	100%
Phase agricole	3,03E-06	20%	2,42E-06	20%	0,00E+00	0%
Phase industrielle	1,05E-05	70%	6,45E-06	53%	3,19E-06	68%
Phase transport	5,25E-07	3%	2,32E-06	19%	4,98E-07	11%
Phase véhicule	1,00E-06	7%	1,00E-06	8%	1,00E-06	21%

Avec des niveaux totaux de potentiel d'émissions par MJ autour de 1,5 E-5 kg équivalent d'éthylène, les biodiesels produits à partir de cultures sur le sol français sont globalement plus émetteurs de molécules à pouvoir oxydant que le carburant fossile de référence. Le soja se situe au même niveau que le diesel, alors que les esters de graisses animales, d'huiles usagées et de palme sont eux en dessous.

Tableau 122 - rappel des résultats pour l'indicateur d'oxydation photochimique : éthanol et ETBE

Phases	Ethanol de Blé E10		Ethanol de betterave E85		E10 ETBE de Blé	
	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ d'éthanol	% du total positif et % du total négatif	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ d'éthanol	% du total positif et % du total négatif	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ d'éthanol	% du total positif et % du total négatif
TOTAL	-6,07E-06	100%	2,61E-05	100%	-6,16E-06	100%
Phase agricole	2,97E-06	34%	1,17E-06	4%	3,01E-06	34%
Phase industrielle	4,90E-06	57%	6,46E-06	25%	4,97E-06	57%
Phase transport	7,98E-07	9%	1,10E-06	4%	8,09E-07	9%
Phase ETBE			1,74E-05	67%	-2,04E-07	1%
Phase véhicule	-1,47E-05	-100%	2,61E-05	100%	-1,47E-05	99%

Les éthanolés présentent en général des niveaux de potentiel d'émissions négatifs lorsque incorporés à faible teneur. Cette baisse résulte de l'étape de combustion pour laquelle les E10 offrent un gain sur l'ensemble du carburant dans lequel ils sont mélangés. Ce gain net est détaillé dans les tableaux suivants.

En revanche, en raison d'émissions de COV augmentant avec la teneur en éthanol du mélange, les E85 montrent des bilans légèrement supérieurs à ceux de l'essence (+30% environ). De même,

l'éthanol provenant de cultures avec brûlis, comme la filière canne à sucre actuelle, présente alors un bilan de loin plus défavorable à celui de l'essence du fait de niveaux élevés d'émissions de CO.

Lorsque incorporé sous forme d'ETBE, les éthanol présentent même un avantage légèrement plus favorable en raison d'une étape de fabrication d'ETBE avec un effet réducteur sur cet indicateur. Comme pour la phase véhicule qui peut présenter des valeurs négatives, il convient de garder à l'esprit que cette valeur négative résulte d'une comparaison implicite entre les MJ apportés sous forme de molécules fossiles dans l'ETBE (autre que l'éthanol : butane, propène, isobutène) et les MJ fossiles du carburant qu'ils remplacent. Cette sorte « d'effet de levier » du MJ d'éthanol est ici favorable car les inventaires des composants fossiles entrant dans l'ETBE sont moins impactants que celui du pétrole brut servant à produire l'essence (cf. annexe 4 et tableau ci-dessous). Le détail des flux est donné dans le paragraphe suivant pour les étapes les plus contributrices et donc à partir d'éthanol.

Tableau 123 – rappel des inventaires pour un kg de produit

Entrant	Oxydation photo- chimique (kg eq C ₂ H ₄ / kg produit)
pétrole, entrée raffinerie	5,60E-06
isobutène raffinerie	4,44E-04
propène	4,44E-04
butane	3,54E-06

Pour positionner l'enjeu de cette réduction, il est intéressant de revenir à la fonction réalisée par ce MJ, le km parcouru (plus parlant que le MJ). Le tableau suivant propose cette comparaison entre le niveau de l'indicateur pour une essence fossile et pour des E10 de différentes filières. On constate que :

- le gain qu'apporterait l'ajout de l'éthanol (ou de l'ETBE) serait de l'ordre de 8% pour un km parcouru.
- la canne à sucre a un comportement atypique du fait des brûlis encore liés à cette culture et qui relâchent de forte quantité de monoxyde de carbone dans l'atmosphère, conférant au carburant qui la reçoit un bilan au km parcouru en augmentation de 50%. Un MJ d'éthanol de canne possède un indicateur 7 fois plus élevé qu'un MJ d'essence standard.

Tableau 124 – écart sur l'indicateur d'oxydation photochimique par km parcouru, pour 3 éthanol

valeurs pour plusieurs éthanol	Résultat sur le cycle de vie, de l'indicateur oxydation photochimique	écart	écart
par km parcouru	kg eq C ₂ H ₄ /km	kg eq C ₂ H ₄ /km	% / E0
E0, euro 4	4,40E-05		
E10 de blé	4,01E-05	-3,91E-06	-8,9%
E10 de betterave	4,01E-05	-3,92E-06	-8,9%

E10 de canne à sucre	6,21E-05	1,81E-05	41,1%
----------------------	----------	----------	-------

▪ Flux contributeurs

Les deux tableaux suivants présentent une désagrégation des flux pour la filière colza et la filière betterave (valeurs par MJ de biocarburant).

Tableau 125 - Détail des flux contributeurs, oxydation photochimique : filière colza

Colza	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ EMHV	part dans le total	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
Total	1,50E-05		20%	70%	3%	7%	
hexane	9,06E-06	60%	0%	100%	0%	0%	émissions bioraffineries
SOx	2,26E-06	15%	72%	19%	9%	0%	fabrication des engrais, mécanisation agricole, puis combustion gaz naturel
COV Non méthanique	1,37E-06	9%	34%	3%	13%	50%	émissions bioraffineries
CO	8,72E-07	6%	45%	10%	9%	36%	fabrication de méthanol et de méthylate de sodium, transports
Méthanol	4,57E-07	3%	3%	97%	0%	0%	émissions bioraffineries
Méthane, fossile	2,39E-07	2%	38%	57%	5%	0%	fabrication des engrais (27%); fabrication méthanol et méthylate de sodium (38%); puis combustion gaz naturel
TOTAL couvert avec ces flux	1,43E-05	95%					

Le bilan d'un B10 de colza sur cet indicateur est lié à 70% aux émissions de l'hexane utilisé dans le procédé d'extraction de l'huile. Cela explique pourquoi les filières n'utilisant pas d'hexane sont en dessous ou à minima au même niveau que la filière diesel. Notons cependant que la valeur d'émission globale de COV utilisée pour cette modélisation est légèrement au dessus des seuils désormais autorisés (1,18 mg/kg traité au lieu de 1mg/kg de produit traité) et peut donc être considérée comme haute. L'étape agricole contribue à cet indicateur dans une moindre mesure à travers la fabrication des engrais. Les transports jouent un rôle assez marqué pour les filières d'importation comme le soja, en augmentant la part des flux liés à la combustion (hydrocarbures, COV, SOx).

Tableau 126 – Détail des flux contributeurs, oxydation photochimique : E10 de blé, sous forme ETBE

E10 Blé, ETBE	Kg eq C ₂ H ₄	part dans les contributions positives ou négatives (chiffre <0)	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape ETBE	Etape combustion
---------------	-------------------------------------	---	---------------------------	--------------------	-----------------	------------	------------------

E10 Blé, ETBE	Kg eq C ₂ H ₄	part dans les contributions positives ou négatives (chiffre <0)	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape ETBE	Etape combustion
Total	-6,16E-06		3,0E-06	5,0E-06	8,1E-07	-2,0E-07	-1,5E-05
CO	-1,42E-05	-72%	4,4E-07	1,4E-07	1,6E-07	-5,3E-08	-1,5E-05
COV Non méthanique	-7,43E-06	-22%	5,8E-07	3,4E-07	2,7E-07	7,0E-07	-9,3E-06
SOx	-9,88E-07	-5%	1,4E-06	5,3E-07	2,5E-07	-3,1E-06	0,0E+00
éthanol	1,10E-05	78%	3,5E-09	3,0E-06	1,3E-10	-6,1E-10	8,0E-06
Méthanol	1,25E-06	9%	3,7E-08	3,6E-08	7,4E-09	1,3E-08	1,2E-06
Méthane, fossile	1,21E-06	9%	9,6E-08	2,7E-07	2,2E-08	8,1E-07	8,2E-09
Acétaldéhyde	3,45E-07	2%	5,1E-08	5,6E-10	4,6E-10	1,4E-09	2,9E-07
pentane	2,75E-07	2%	8,7E-08	1,3E-07	2,6E-08	2,8E-08	0,0E+00

Pour les éthanol, le gain qu'apportent les mélanges E10 sur un carburant E0 pour cet indicateur provient principalement de la réduction du monoxyde de carbone. La réduction des émissions de CO est l'élément qui pèse le plus dans cette baisse. En modifiant la composition des COV émis lors de la combustion (plus d'émissions d'éthanol au détriment de COV non spécifiés), compte tenu des facteurs de caractérisation CML utilisés, l'E10 apporterait un gain par rapport à l'E0 du fait d'un pouvoir oxydant plus faible pour l'éthanol que pour les COV non spécifiés (moyenne des pouvoirs oxydants des COV). Mais la valeur faible de ce gain et la limite méthodologique d'une valeur de photo-oxydation moyenne attribuée au COV moyen appellent à la prudence sur ce second aspect.

Les émissions d'éthanol lors des étapes industrielle et véhicule surtout sont le premier poste contributeur positif.

Tableau 127 – Détail des flux contributeurs, oxydation photochimique : E85 de betterave

Betterave, E85	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ d'éthanol	part dans les contributions positives ou négatives (chiffre <0)	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
Total	2,61E-05		1,2E-06	6,5E-06	1,1E-06	1,7E-05	
éthanol	1,22E-05	47%	0%	34%	0%	66%	émission véhicule et émissions de l'étape industrielle
COV Non méthanique	4,13E-06	16%	8%	11%	13%	68%	Recouvre les émissions lors de la fermentation et distillation (notamment éthanol); puis étape véhicule
CO	4,66E-06	18%	3%	3%	4%	90%	phase véhicule, mais de niveau plus faible à E0

Betterave, E85	Kg eq C ₂ H ₄ / MJ d'éthanol	part dans les contributions positives ou négatives (chiffre <0)	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
SOx	1,31E-06	5%	36%	46%	18%	0%	émissions liées à la combustion (mécanisation et GN)
toluène	3,06E-07	1%	6%	14%	2%	79%	émission véhicule
Méthane, fossile	3,88E-07	1%	5%	83%	8%	5%	combustion Gaz Naturel (GN)
Acétaldéhyde	1,80E-06	7%	2%	0%	0%	98%	émission véhicule
pentane	2,06E-07	1%	12%	75%	13%	0%	combustion Gaz Naturel (GN); puis fabrication des produits chimiques
TOTAL couvert avec les flux positifs	2,50E-05	96%					

Pour l'éthanol inclus dans l'E85, le bilan est tout autre. L'augmentation des émissions véhicule en éthanol, en acétaldéhyde et en COVNM génériques, ainsi qu'une baisse plus faible que pour l'éthanol inclus dans l'E10 des émissions de CO (alors que le taux d'incorporation a fortement augmenté), conduisent à un impact de niveau positif pour tous les éthanols incorporés sous forme d'E85. A ce niveau de mélange, l'impact potentiel de ces émissions dépasse ainsi légèrement celui des essences pour cet indicateur.

▪ **Analyse de sensibilité : tests sur les émissions photo-oxydantes de l'étape industrielle**

Comme évoqué, la valeur retenue pour l'étape industrielle du site d'estérification est relativement élevée et dépasse légèrement le seuil réglementaire de 1 mg/kg. Elle a aussi été construite à partir des données d'un site estimé représentatif. C'est pourquoi il a été pratiqué une analyse de sensibilité sur ce paramètre. Le tableau suivant présente les calculs qui ont été conduits. Les émissions d'hexane et de méthanol ont été modifiées de +/- un tiers pour calculer une valeur haute et une valeur basse plausible autour du résultat présenté dans ce chapitre.

Tableau 128 -Analyse de sensibilité : test sur les émissions photo-oxydantes des sites d'estérification

Emissions dans l'Air (direct)	valeur retenue (kg/ t EMHV)	Valeur basse	Valeur haute
principe	1	-33%	+33%
COVNM, hors méthanol (hexane)	1,18	7,9E-01	1,6
Méthanol (alcool méthylique)	8,00E-03	5,4E-03	1,1E-02

Tableau 129 - EMHV de colza : résultats de l'analyse de sensibilité sur le potentiel d'oxydation photochimique des émissions des sites d'estérification

Oxydation (kg eq C ₂ H ₄ /MJ)	Etape INDUSTRIELLE	Autres Etapes	Total
---	--------------------	---------------	-------

d'EMHV)			
valeur basse	7,20E-06	4,84E-06	1,20E-05
valeur retenue	1,02E-05	4,84E-06	1,50E-05
valeur haute	1,36E-05	4,84E-06	1,84E-05

Le même test a été réalisé sur la filière blé afin d'estimer l'impact du choix de modélisation de répartition des émissions polluantes de l'étape raffinerie ainsi que le fait d'avoir utilisé un seul jeu de donnée pour représenter les sites de production d'éthanol.

Tableau 130 – Analyse de sensibilité : tests sur les émissions d'éthanolerie

(en kg/ t éthanol)	Valeurs retenues pour l'étude	Valeur basse	Valeur haute
principe	1	-33%	+33%
COVNM	3,80E-01	2,5E-01	5,0E-01

Tableau 131 - Résultat éthanol de blé (par MJ), analyse de sensibilité sur le potentiel d'oxydation photochimique de l'étape bioraffinerie

Oxydation, en kg eq C ₂ H ₄ / MJ d'éthanol	Etape INDUSTRIELLE	Autres étapes	Total
valeur basse	3,78E-06	-1,10E-05	-7,19E-06
valeur retenue	4,90E-06	-1,10E-05	-6,07E-06
valeur haute	5,95E-06	-1,10E-05	-5,02E-06

La réalisation de ces tests montre la sensibilité forte de ce paramètre sur l'indicateur potentiel d'« oxydation photochimique », puisque ce dernier varie de +/- 25 % lorsque le niveau d'émission de l'éthanolerie augmente ou est réduit de 33%. Cela est lié au poids très fort de l'étape industrielle, masqué par la compensation que crée la modification des gaz d'échappement

▪ Synthèse sur cet indicateur

Les effets sur cet indicateur sont à l'inverse des effets calculés pour l'indicateur potentiel de toxicité humaine. Les esters détériorent légèrement l'indicateur potentiel de photo-oxydation sur le cycle de vie, alors que les éthanolés présentent un bilan plus favorable que la référence fossile grâce à leur modification sur les émissions véhicule.

Cet écart reste cependant assez peu marqué dans le cas des esters. L'analyse de sensibilité pratiquée montre qu'une baisse de 33% de la valeur utilisée comme niveau d'émission représentatif des sites d'estérification suffit à rapprocher la valeur de ces filières de la valeur du diesel fossile. Avec un chiffre utilisé ici dépassant déjà la norme actuelle des 1 mg de COV / kg d'huile, et avec des normes et des efforts industriels allant vers la réduction des émissions de COV, il est probable que le constat à dresser ici **soit plus celui d'une équivalence sur cet indicateur entre esters et diesel fossile.**

Pour les éthanolés, afin de confirmer l'avantage que semblent créer les filières ne faisant pas appel au brûlis, il serait nécessaire de confirmer plus avant les effets de baisse d'émission du monoxyde de carbone sur une gamme large de véhicules. La connaissance fine des molécules émises, ainsi que leurs facteurs d'oxydation respectifs, et ce notamment au niveau de l'éthanol et du reste des COV émis, apporteraient les confirmations nécessaires. Mais il faut garder à l'esprit que l'incorporation d'un sixième d'éthanol provenant de culture utilisant le brûlis compenserait ces quelques pourcents de bénéfices.

A côté de ce risque et si ce gain s'avérait confirmé par d'autres travaux, savoir si cette réduction est d'un niveau important est une question importante. Le gain global de 8% des émissions photo-oxydantes par km parcouru entre un E0 et un E10 se traduit concrètement par une baisse de 18% des émissions de monoxyde de carbone entre les deux cycles de vie (voir tableau ci-dessous). Appliqué à l'ensemble du parc français de véhicules essence, cela représente une baisse équivalente à la moitié des émissions annuelles de monoxyde de carbone des 13 raffineries françaises utilisées pour modéliser les émissions du raffinage¹⁶. Y répondre demanderait de plus de réfléchir à l'urgence environnementale pesant sur cet indicateur (quels risques et quels coûts sanitaires par exemple ?), à la contribution du monoxyde de carbone dans le total des émissions impactantes, aux sources d'émission de CO et à partir de là, à l'étude de solutions d'amélioration.

Tableau 132 – mise en perspective des gains d'émission de CO des éthanol (hors canne)

Résultat sur le cycle de vie, des émissions de monoxyde de carbone, par km parcouru	kg CO /km
E0	4,98E-04
E10	4,08E-04
écart par km parcouru entre un E10 et un E0	-9,01E-05
écart pour 135 milliards de km (kilométrage annuel du parc essence français)	-12 159 tonnes de CO /an
Emissions annuelles de CO des 13 raffineries françaises	27 670 tonnes de CO / an

¹⁶ La donnée du registre des polluants est indicative, aucune émission de CO n'étant donnée pour certaines raffineries de taille importante dans ce registre en ligne.

7.1.5. SUR LES POTENTIEL D'EMISSIONS EUTROPHISANTES

Comme on pouvait s'y attendre, les biocarburants ont des potentiels d'émission de molécules eutrophisantes dont l'indicateur, mesuré en équivalent PO_4 , est environ 20 fois plus important que pour leurs homologues fossiles. Même si le modèle de prise en compte du potentiel eutrophisant est discutable (il ne mesure qu'un potentiel d'eutrophisation) et que les hypothèses de lessivage des nitrates et surtout du phosphate sont à affiner, l'effet existe indéniablement. Les niveaux sont très proches entre esters et éthanol. Seules les filières EMHV sont détaillées ici.

7.1.5.1 Filières fossiles

Les filières fossiles sont assez peu contributrices sur cet enjeu environnemental. Le diesel l'est un peu plus à travers les émissions d'oxydes nitreux lors de la combustion. L'émission de DCO lors de l'extraction et du raffinage contribue aussi à ces effets.

Tableau 133 – Potentiel d'émissions eutrophisantes d'un carburant gazole, pour un MJ

Diesel B0	kg éq PO_4^{3-}	Etape extraction	Etape raffinage	Etape transport	Etape combustion
TOTAL	3,71E-05	41%	7%	1%	52%
NOx	2,62E-05	19%	7%	1%	73%
DCO	1,03E-05	95%	5%	0%	0%

Tableau 134 – Potentiel d'émissions eutrophisantes d'un carburant essence pour un MJ

Essence E0	kg éq PO_4^{3-}	Etape extraction	Etape raffinage	Etape transport	Etape combustion
TOTAL	1,80E-05	84%	11%	2%	4%
NOx	7,28E-06	67%	20%	4%	9%
DCO	1,02E-05	96%	4%	0%	0%

7.1.5.2 Cas des biocarburants

L'étape agricole est de loin la plus contributrice. Il faudrait réduire d'un facteur vingt le lessivage pour arriver à des niveaux plus comparables aux carburants fossiles, et malgré cela, les biocarburants resteraient au dessus. Car en effet, les émissions d'ammoniac vers l'air en raison des apports d'engrais ont une contribution de près de 20% de cette étape. Soulignons que la légère augmentation des émissions de NOx lors de la combustion (+3%) est infime comparée aux lessivages en champ.

Les éthanol présentent une répartition des émissions avec un poste plus marqué sur l'étape industrielle. Cela tient au niveau d'émission modélisé pour l'étape industrielle (notamment la DCO : 0,04 kg DCO/kg éthanol contre 0,0018 kg DCO/kg EMHV). Cela est lié au traitement d'un nombre plus important d'effluents en éthanolerie, avec notamment les résidus (condensats,...) du traitement des vinasses.

L'éthanol incorporé sous forme d'ETBE montre un léger gain par rapport à l'incorporation directe. Là aussi, comme pour les deux indicateurs précédents, des impacts plus faibles (ou modélisés plus faibles : pas de DCO répertoriée sur le site iREP pour le site de LYONDELL à Fos sur Mer) sur les

étapes de transformations font que l'ETBE présente un second avantage en incorporant des bases fossiles estimées moins émettrices de molécules eutrophisantes (voir annexe 4 ou tableau suivant).

Tableau 135 – Potentiel d'émissions eutrophisantes des filières colza et soja

Phases	Colza		Soja	
	Kg éq PO ₄ ³⁻ / MJ de biocarburant	% / total	Kg éq PO ₄ ³⁻ / MJ de biocarburant	% / total
Total	3,65E-04	100%	1,79E-04	100%
Phase agricole	3,17E-04	87%	1,28E-04	72%
Phase industrielle	2,08E-05	6%	9,17E-06	11%
Phase transport	1,35E-06	0%	2,73E-06	3%
Phase véhicule	2,53E-05	7%	1,17E-05	14%

Tableau 136 - Potentiel d'émissions eutrophisantes des filières blé (éthanol et ETBE)

Phases	Blé, éthanol		Blé, ETBE	
	Kg éq PO ₄ ³⁻ / MJ de biocarburant	% / total	Kg éq PO ₄ ³⁻ / MJ de biocarburant	% / total
Total	4,11E-04	100%	4,05E-04	100%
Phase agricole	2,78E-04	68%	2,81E-04	68%
Phase industrielle	1,28E-04	31%	1,30E-04	31%
Phase transport	4,17E-06	1%	4,23E-06	1%
Phase ETBE			6,50E-07	0%
Phase véhicule	6,50E-07	0%	-1,12E-05	-100%

Tableau 137 – Eutrophisation EMHV de Colza : Détails des flux contributeurs

colza	kg éq PO ₄ ³⁻ par MJ de biocarburant	% dans le total	Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
TOTAL	3,65E-04		87%	6%	0%	7%	
Nitrate	2,08E-04	57%	100%	0%	0%	0%	lessivage des nitrates
Ammoniaque	5,94E-05	16%	100%	0%	0%	0%	émissions après épandage
NOx	4,27E-05	12%	35%	3%	3%	59%	combustions
DCO	1,82E-06	0%	32%	63%	5%	0%	émissions de la bioraffinerie; puis fabrication des engrais
phosphate	3,42E-05	9%	98%	2%	0%	0%	lessivage de phosphate
Phosphore	1,76E-05	5%	0%	100%	0%	0%	émissions de la bioraffinerie
ion ammonium	4,60E-07	0%	97%	2%	0%	0%	fabrication des engrais (pour plus de 90% du total)

Tableau 138 - Eutrophisation éthanol de blé : Détails des flux contributeurs

blé	kg éq PO ₄ ³⁻		Etape production agricole	Etape industrielle	Etape transport	Etape combustion	Postes contributeurs
TOTAL	4,11E-04		2,8E-04	1,3E-04	4,2E-06	6,5E-07	
Nitrate	1,91E-04	47%	100%	0%	0%	0%	lessivage des nitrates
Phosphore	6,80E-05	17%	0%	100%	0%	0%	émissions après épandage
Ammoniac	4,79E-05	12%	100%	0%	0%	0%	combustions
Phosphate	2,19E-05	5%	99%	0%	0%	0%	émissions de la bioraffinerie; puis fabrication des engrais
NOx	2,12E-05	5%	71%	8%	18%	3%	lessivage de phosphate
DCO	3,79E-05	9%	2%	98%	1%	0%	émissions de la bioraffinerie
Ammonium, ion	4,89E-07	0%	97%	2%	1%	0%	fabrication des engrais (pour plus de 90% du total)

7.1.5.3 Analyse de sensibilité

Comme précédemment, il a été estimé nécessaire de réaliser une analyse de sensibilité sur les résultats. Deux paramètres ont été testés :

- la construction des inventaires d'émission des bioraffineries
- les valeurs utilisées pour le lessivage agricole.

▪ Analyse de sensibilité sur les inventaires d'émission des bioraffineries

Deux tests ont été conduits : un calcul majorant de 33% le niveau des émissions potentiellement eutrophisantes vers l'eau, et un second calcul réduisant le niveau utilisé de -33%. Les valeurs introduites dans les calculs sont détaillées dans les tableaux suivants.

Tableau 139- Analyse de sensibilité : test sur les émissions eutrophisantes des sites d'estérification

Emissions vers l'eau	valeur retenue (kg/ t EMHV)	Valeur basse	Valeur haute
principe	1	-33%	+33%
Demande chimique en oxygène (DCO)	1,09	7,3E-01	1,4
Méthanol (alcool méthylique)	2,32E-02	1,6E-02	3,1E-02
Phosphore total (P)	2,12E-01	1,4E-01	2,8E-01

Tableau 140 - Analyse de sensibilité : test sur les émissions eutrophisantes des éthanoleries

Emissions vers l'eau	valeur retenue (kg/ t EMHV)	Valeur basse	Valeur haute
principe	1	-33%	+33%
Demande chimique en oxygène (DCO)	1,39	9,3E-01	1,8
Méthanol (alcool méthylique)	5,94E-01	4,0E-01	7,8E-01
Phosphore total (P)	4,37E+01	2,9E+01	5,8E+01

Sur ces bases, il a pu être estimé l'influence de ce paramètre dans le résultat final (cf. les deux tableaux ci-dessous). Bien moindre que dans le cas de l'oxydation photochimique, une variation de +/- 33% des niveaux d'émission des sites de bioraffinage entraîne une variation plus ou moins 15% pour l'indicateur potentiel d'eutrophisation. La partie industrielle est en effet moins dominante dans le bilan global. Les limites inhérentes à ces inventaires influencent donc de manière modérée le résultat.

Tableau 141 – Résultat EMHV de colza (par MJ) de l'analyse de sensibilité sur le potentiel d'eutrophisation des émissions des sites d'estérification

Eutrophisation (kg e PO ₄ ³ /MJ d'EMHV)	Etape INDUSTRIELLE	Autres Etapes	Total
valeur basse	1,48E-05	3,42E-04	3,57E-04
valeur retenue	2,20E-05	3,42E-04	3,64E-04
valeur haute	2,67E-05	3,42E-04	3,68E-04

Tableau 142 - Résultat éthanol de blé (par MJ), analyse de sensibilité sur le potentiel d'eutrophisation de l'étape bioraffinerie

Eutrophisation, (kg e PO ₄ ³ /MJ d'éthanol)	Etape INDUSTRIELLE	Autres Etapes	Total
valeur basse	8,60E-05	2,82E-04	3,68E-04
valeur retenue	1,28E-04	2,82E-04	4,11E-04
valeur haute	1,67E-04	2,82E-04	4,49E-04

▪ **Analyse de sensibilité sur les valeurs utilisées pour le lessivage agricole**

De même, les impacts de potentiels écarts sur la valeur retenue pour le lessivage de l'azote et du phosphore ont été testés. L'estimation de la marge d'erreur se situe entre +/- 40 à 50% autour des 40 unités d'azote et 0,06 kg de phosphore intégrés dans les calculs comme référence. L'impact de cette marge d'incertitude n'est pas neutre : une variation de 50% à la hausse ou à la baisse sur le lessivage de nitrate modifie de 22% le résultat final.

En revanche, l'augmentation de 100% de la valeur du lessivage des phosphates montre un impact marginal de ce paramètre dans le résultat.

Tableau 143 – Analyse de sensibilité : test sur le lessivage agricole, éthanol de blé

Eutrophisation (kg PO ₄ ³ / MJ éthanol)	Etape agricole	Autres Etapes	Total	Evolution par rapport au résultat de référence
valeur basse lessivage de N : 20 Unités de N / an / ha (-50%)	1,85E-04	1,33E-04	3,19E-04	-22%
valeur retenue lessivage de N : 40 Unités de N / an / ha	2,78E-04	1,33E-04	4,11E-04	0%
valeur haute lessivage de N : 60 Unités de N / an / ha (+50%)	3,70E-04	1,33E-04	5,03E-04	+22%
valeur haute lessivage de P : 0,12 kg P / an / ha (+100%)	2,83E-04	1,33E-04	4,16E-04	+1%

7.1.5.4 Synthèse

L'impact sur le potentiel d'eutrophisation est indéniablement en défaveur des filières biocarburants. L'étape agricole, malgré les efforts des agriculteurs, pèse toujours de manière prépondérante sur ces bilans.

En revanche et en imaginant que le lessivage des nitrates et phosphates soit endigué à des valeurs inférieures à 5 unités par an par hectare pour l'azote et moins de 0,005 kg P / an / ha, et que les éthanoleries présentent des niveaux de rejets deux fois inférieurs à ceux considérés ici, le résultat sur le cycle de vie d'un éthanol diminuerait mais resterait supérieur au niveau de celui de la filière essence (1,6E-4 contre 1,8E-5). Même en intégrant l'effet d'incorporation sous forme d'ETBE, le résultat reste au dessus (1,5E-4). Cela est dû au trois autres postes d'émissions que sont la fabrication des engrais, les émissions de NOx au champ et, le plus important (après le lessivage et l'étape industrielle), les émissions d'ammoniac lors de l'épandage d'engrais.

Dans ces conditions, il semble donc que l'on puisse conclure que sur cet indicateur, l'effet est indéniablement en défaveur des biocarburants, comme on pouvait s'y attendre, et qu'il ne semble pas envisageable de pouvoir le réduire de manière drastique.

Il reste que ce calcul mesure un potentiel d'eutrophisation des molécules émises. Ces potentiels sont eux-mêmes calculés avec une approche assez simple de ce phénomène. Toute molécule contribue à l'eutrophisation à hauteur de son nombre d'atomes d'azote et de phosphore). Apporter un jugement plus poussé sur le risque que présente cet écart nécessiterait alors de rentrer dans le détail du phénomène d'eutrophisation et d'y injecter des paramètres de localisation géographique (une même molécule n'a pas le même effet selon le milieu, l'époque pendant laquelle elle est émise, ...), ce qui sort du cadre de cette étude.

8. AUTRES ANALYSES

Cette partie rassemble différentes analyses de sensibilité et mises en perspectives.

Des tests de sensibilité sont tout d'abord présentés pour juger de la robustesse des valeurs proposées. Un premier test est conduit sur les méthodes d'allocations. La charge attribuée aux coproduits destinés à l'alimentation animale est communiquée. Les effets du niveau de mélange sont aussi évoqués afin de compléter et d'utiliser pleinement le champ de l'étude. Un bilan des résultats de l'analyse de sensibilité sur **les changements d'affectation des sols** est dressé, dont l'approche a été présentée dans la partie méthodologique.

Ces bilans n'étant bien entendu pas figés dans le temps, les évolutions prévisibles de ces résultats sont présentées à partir des scénarii prospectifs mis en place. Enfin, une partie traite d'une piste de travail à approfondir concernant les **effets d'incorporation de biocarburant dans le pool des carburants fossiles**. Cet élément pourrait venir modifier partiellement voire substantiellement certains bilans, notamment celui des ETBE.

8.1. ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LES METHODES D'ALLOCATIONS MISES EN PLACE

Le choix de la méthode d'imputation des impacts aux coproduits est toujours un point sensible dans la réalisation d'une ACV. Tout comme dans d'autres domaines, trouver une clé de répartition qui traduise équitablement la valeur ou l'intérêt mis dans chaque coproduit est un sujet délicat. Comme le référentiel le recommande, une analyse de sensibilité est conduite sur ce paramètre afin d'en juger des effets.

Trois autres modes d'imputation des impacts ont été testés :

- l'allocation massique : les charges et émissions amonts à l'étape de séparation des coproduits leur sont attribuées au prorata de leur poids respectif.
- l'allocation économique : ce prorata est effectué en multipliant les quantités produites (masses) par la valeur économique respective de chaque coproduit, valeur estimée représenter plus justement l'intérêt porté dans la fabrication du produit.
- La substitution : dans un premier temps, la totalité des charges environnementales de la filière de production du biocarburant et des coproduits est imputée au biocarburant lui-même. Dans un deuxième temps, on déduit de ces charges les impacts environnementaux évités en raison de la valorisation des coproduits, qui se substituent à la production d'autres types de produits à déduire.

Afin de rester dans un cadre comparable, ces simulations ont été faites en conservant l'approche de répartition des charges conduite étape après étape, et non d'une méthodologie type boîte noire qui répartirait en une fois l'ensemble des flux des étapes industrielle et amont entre les deux coproduits finaux sur la base de leur masse, valeur, etc.

8.1.1. ALLOCATION MASSIQUE

Les deux tableaux suivants présentent les bilans sur les 5 indicateurs en cas d'allocation massique ou énergétique. Les analyses suivantes peuvent en être tirées :

- L'impact du choix entre allocation énergétique et massique est assez marqué pour les filières biodiesel (cf. colza ci-dessous), le PCI de l'huile étant deux fois plus élevé que le PCI des tourteaux. Les bilans réalisés sous allocation massique donnent des résultats encore plus favorables aux esters.

Tableau 144 – comparaison entre allocation énergétique et allocation massique, EMHV de colza

	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJf / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
allocation énergétique	0,431	3,73E-02	1,50E-05	-6,48E-01	3,64E-04
allocation massique	0,367	2,79E-02	1,11E-05	-6,58E-01	2,60E-04
variation entre énergétique et massique	-15%	-25%	-26%	2%	-28%

- L'écart est très faible et inversé pour les filières éthanol, comme l'illustre le cas du blé, où une allocation purement massique entre sucre et matière sèche des futures drèches puis entre éthanol et matière sèche, présente un résultat de 1 à 3% supérieur selon les indicateurs. Cela tient au fait que le PCI du sucre servant à faire la répartition des charges amont est très légèrement inférieur à celui de la matière sèche du mélange amenée à devenir les drèches (17 MJ/kg contre 18,2). L'allocation énergétique est donc très proche d'une allocation massique entre sucre et futures matières sèches.

Tableau 145 - comparaison entre allocation énergétique et allocation massique, éthanol de blé

	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJf / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Filière principale, allocation énergétique	0,620	4,62E-02	-6,07E-06	5,11E-02	4,11E-04
Filière principale, allocation massique	0,627	4,70E-02	-5,92E-06	5,20E-02	4,18E-04
variation entre énergétique et massique	1%	2%	-2%	2%	2%

8.1.2. ALLOCATION ECONOMIQUE

La réalisation d'allocation économique est complexe dans sa mise en œuvre. Elle se heurte en effet à plusieurs difficultés : quels prix utiliser (cours officiels, prix pratiqués par les professionnels,...) ? Sur quelle période faut-il moyenner les cours ? Etc. Mais son problème principal réside surtout dans l'absence de valeurs pour bon nombre de produits en cours d'élaboration.

Ne souhaitant pas résoudre l'ensemble de ces problèmes dans cette analyse, la simulation d'une allocation économique a été cantonnée pour cette partie aux filières biodiesel. En effet, les prix des coproduits existent alors en tant que tels : huile pour l'huile raffinée, et qui peut sans trop d'approximation être attribuée à l'huile brute, les tourteaux et la glycérine. Deux niveaux de prix ont été proposés :

- un calcul avec un niveau estimé réaliste, avec un tourteau autour de 140 €/tonne et une huile à 330 €/tonne,
- et un calcul avec des niveaux de prix plus potentiels, présentant un niveau de cours élevé pour l'huile sous l'effet potentiel d'un prix soutenu des biocarburants (500 €/tonne), avec un tourteau à 150 €/tonne.

Compte tenu des fluctuations de prix et de son impact plus marginal, le prix de la glycérine a été modélisé comme équivalent à celui de l'ester, hypothèse plutôt défavorable à l'ester.

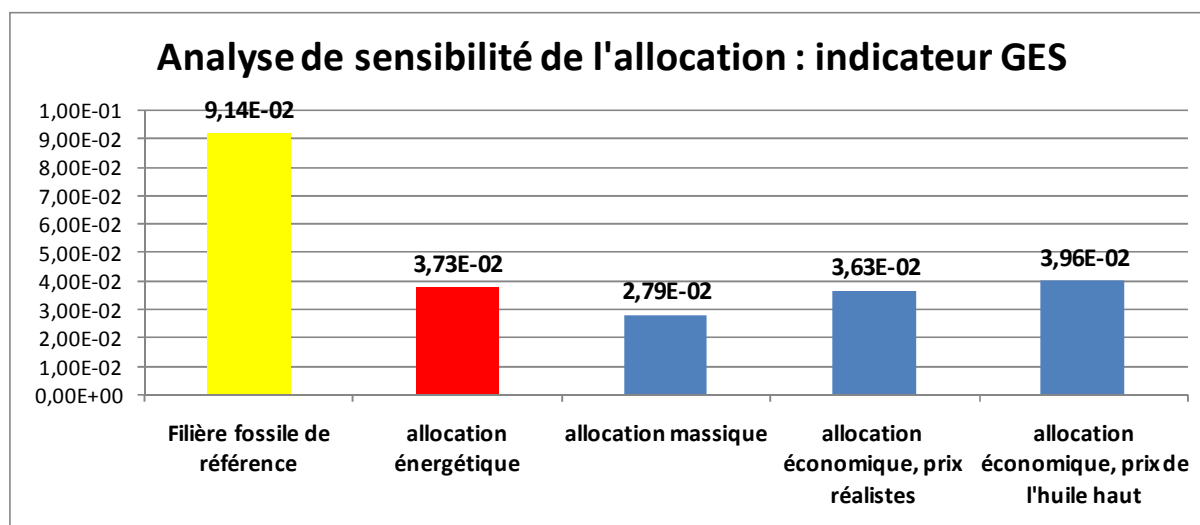
Il n'est pas présenté pour les éthanols de résultats de test pour l'allocation économique. Mais comme cela a été estimé dans le travail méthodologique ayant conduit au référentiel, il est délicat d'attribuer au sucre, aux fibres et autres matières contenues dans le vin de fermentation le prix des produits finis (sucre vendu, DDGS séchées). Ces produits nécessitent leurs propres étapes de préparation, qui créent ainsi leur valeur. Trop critiquable sans réflexion plus approfondie, cet exercice n'a pas été conduit dans le présent cadre.

Les résultats de ces tests sont proposés dans le tableau ci-dessous, dont une partie est repris dans deux graphiques illustratifs suivants.

Tableau 146 - comparaison entre allocation énergétique et allocation économique, EMHV de colza

	Energie primaire non renouvelable	Emissions de GES	Oxydation photochimique	Toxicité humaine	Eutrophisation
	MJ / MJ	kg éq. de CO ₂ / MJ	kg éq. de C ₂ H ₄ / MJ	kg éq. de 1,4-DB / MJ	kg éq. de PO ₄ ³⁻ / MJ
Filière fossile de référence	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
allocation énergétique	4,31E-01	3,73E-02	1,50E-05	-6,48E-01	3,64E-04
allocation économique, prix élevé de l'huile	4,40E-01	3,96E-02	1,60E-05	-6,45E-01	3,91E-04
variation entre économique et énergétique	2%	6%	7%	0%	7%
allocation économique, prix réalistes	4,15E-01	3,63E-02	1,47E-05	-6,48E-01	3,57E-04
variation entre économique et énergétique	-4%	-3%	-2%	0%	-2%

Figure 59 – illustration des différentes allocations : indicateur émission de GES pour l'EMHV de colza (kg eq CO₂/MJ)



Même dans le cas d'allocation économique avec un cours de l'huile élevé, les bilans du « champ à la roue » présentent des écarts modérés par rapport au résultat calculé sous allocation énergétique.

8.1.3. APPROCHE PAR SUBSTITUTION

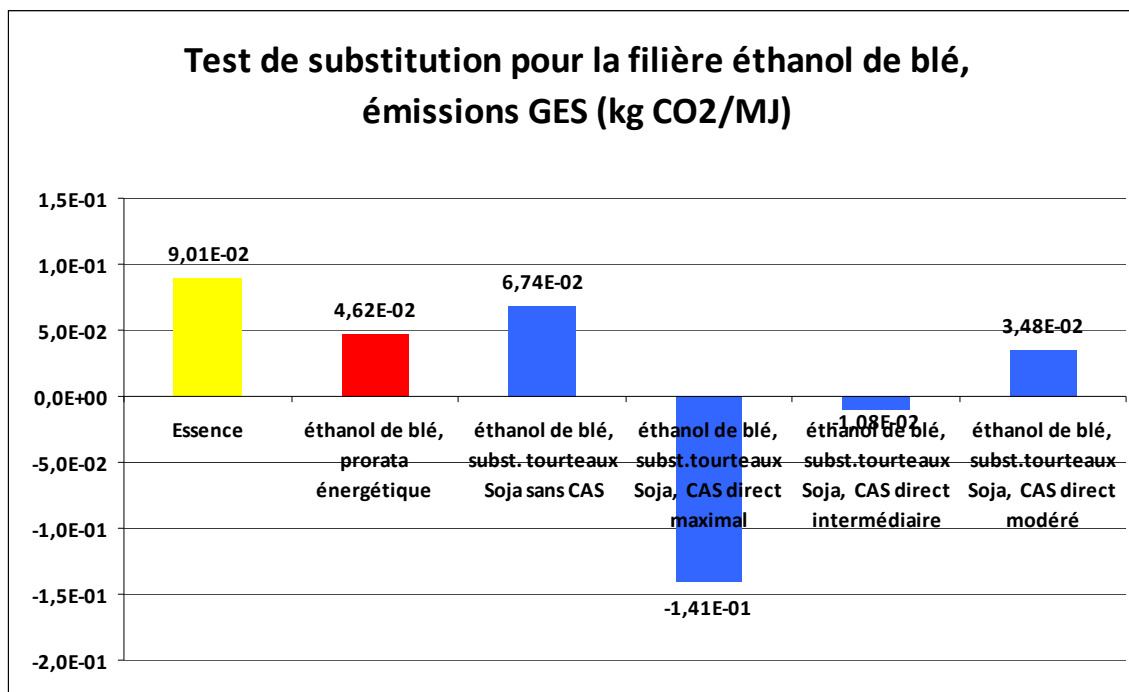
Les données fournies dans ce rapport permettent potentiellement de réaliser des calculs de substitution pour les émissions de GES des biocarburants, du champ à la roue. Ce paragraphe en propose deux exemples

8.1.3.1 Exemple pour l'éthanol de blé :

Une simulation de substitution du tourteau de soja par des drèches de blé est présentée ci-après. Lorsqu'un MJ d'éthanol de blé est produit, une quantité de 39 g de drèches est produite. On considère que cet aliment remplacerait la fabrication de 32,5 g de tourteaux de soja, dont le bilan d'émission de GES est calculé à partir de l'allocation énergétique défini dans cette étude. Un tableau détaillé des calculs est donné en annexe 8.

Ces simulations sont également proposées dans un deuxième temps pour différents niveaux de CAS direct pour le soja originaire du Brésil, qui représente ici 66% des approvisionnements en tourteaux de soja. La même répartition que celle considérée précédemment dans le rapport pour les importations d'huile de soja a été considérée pour l'origine des tourteaux de soja substitués pour cet exemple. Ces changements d'affectation des sols sont en effet à considérer dans le cas des cultures importées, conformément au référentiel.

Figure 60 – Illustration du calcul par substitution des tourteaux de soja par des drèches de blé, sans et avec prise en compte de CAS directs pour la culture de soja au Brésil : émissions de GES de l'éthanol de blé



Cette approche est une version très simplifiée de ce que pourrait être un calcul par substitution. Aller jusqu'au bout de la méthode soulève en effet trois types de difficultés (i) réfléchir à des scénarii de substitution pour tous les produits impactés par la substitution, **et donc de considérer une cascade de modifications en général**. (ii) Choisir le produit exact qui sera substitué. Il a ici été considéré que le produit qui serait le plus probablement substitué serait le tourteau de soja, mais d'autres hypothèses seraient possibles. (iii) réaliser une modélisation complète, robuste et consensuelle des changements d'affectation des sols. C'est ce qu'illustre la figure 60 intégrant des niveaux possibles d'impact du changement d'affectation des sols. Le résultat devient alors pleinement dépendant de la modélisation de ces changements.

Les résultats de ces analyses de sensibilité sont rappelés dans le tableau ci-après.

Tableau 147 - comparaison entre allocation énergétique et méthode de substitution : émissions de GES de l'éthanol de blé

	Filière fossile de référence	allocation énergétique	Substitution, sans CAS soja	variation entre énergétique et substitution	Substitution, avec CAS soja maximum	variation entre énergétique et substitution	Substitution, avec CAS soja intermédiaire	variation entre énergétique et substitution	Substitution, avec CAS soja modéré	variation entre énergétique et substitution
Emissions GES (kg éq. de CO ₂ / MJ)	9,01E-02	4,62E-02	6,74E-02	46%	-1,41E-01	-405%	-1,08E-02	-123%	3,48E-02	-25%

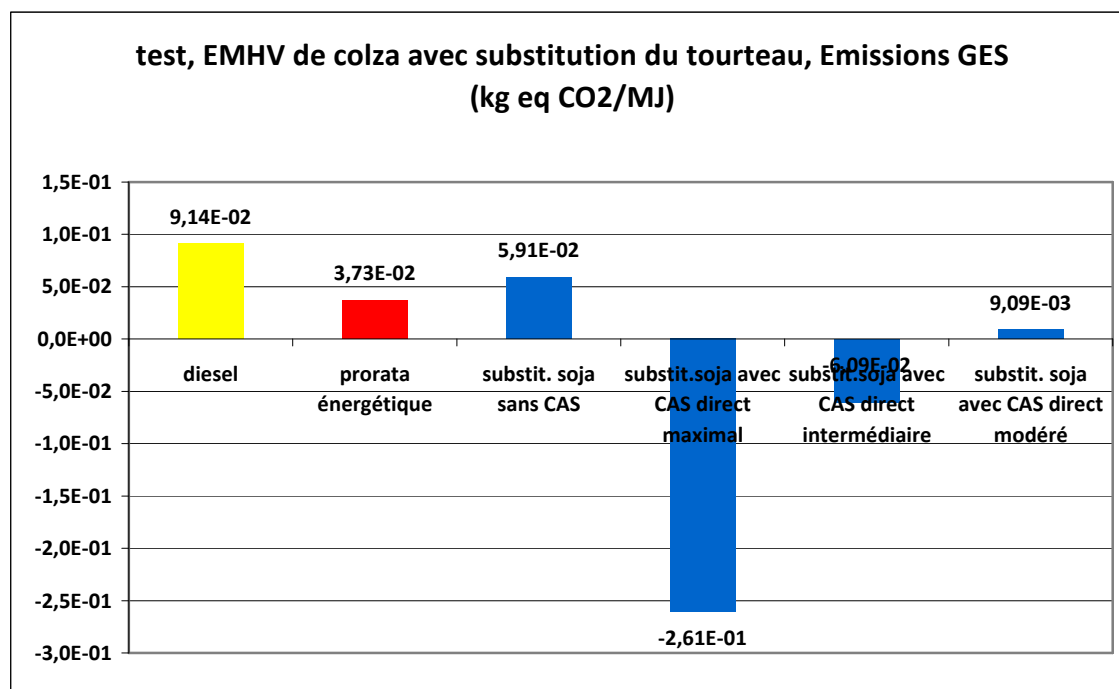
8.1.3.2 Exemple pour l'ester de colza :

Un second exemple d'utilisation de la méthode par substitution pour les biodiesels est présenté ci-après. Un tableau détaillé des calculs est donné en annexe 8.

La formule de calcul de substitution tient compte des substitutions en cascade, plus faciles à modéliser dans le cas de substitution entre huiles. La substitution de tourteau de soja par des tourteaux de colza conduit à une production moindre d'huile de soja, qu'il faut compenser par une production supposée supérieure d'huile de colza. La quantification des crédits d'impacts environnementaux qu'il est possible d'affecter aux tourteaux de colza tient compte de ce fait¹⁷.

En appliquant cette formule aux données de calcul de l'annexe 8, on obtient les résultats de la figure suivante.

Figure 61 – Exemple de calcul par substitution des tourteaux pour les EMHV de colza : émission de GES (sans et avec CAS direct au tourteau de soja brésilien substitué)



La production d'huile et de tourteau de soja entraîne des niveaux d'émission de GES inférieurs à ceux de l'huile et du tourteau de colza, quand on ne prend pas en compte le CAS direct pour le soja (cf tableau en annexe 8).

Du fait de cet impact plus faible de la culture de soja par rapport à celle de colza au kg d'huile produit, substituer du tourteau de colza au tourteau de soja s'avèrerait globalement être pénalisant. Il serait donc peu pertinent de les remplacer par des productions à base de colza. Un même raisonnement pourrait s'appliquer pour l'alimentation animale. Il montrerait qu'il vaut mieux, si l'on ne tient pas compte du CAS direct, importer des tourteaux de soja que d'essayer de les produire localement¹⁸.

Comme pour les éthanol, la prise en compte du CAS direct du soja (à considérer de manière obligatoire dans le cas des cultures importées, conformément au référentiel) renverse la tendance et donne même des valeurs plus favorables à l'EMHV de colza que ce qui est obtenu par prorata énergétique.

¹⁷ pour plus d'explication, voir le référentiel 2008, § 7.4 et 7.5

¹⁸ La présente simulation a été raffinée pour améliorer la substitution testée : la véritable substitution devrait avoir lieu entre produits identiques dans leur qualité et leur localisation. Il a donc été ajouté au crédit de la production d'EMHV de colza l'économie du transport du tourteau de soja que son tourteau remplacerait. Ce raffinement enlèverait 1 gramme eq. CO₂ / MJ d'EMHV de colza produit aux résultats présentés.

Les résultats de ces deux essais de simulation sont rappelés dans le tableau ci-après.

Tableau 148 - comparaison entre allocation énergétique et méthode de substitution : émissions de GES de l'EMHV de colza

	Filière fossile de référence	allocation énergétique	Substitution, sans CAS soja	variation entre énergétique et substitution	Substitution, avec CAS soja maximum	variation entre énergétique et substitution	Substitution, avec CAS soja intermédiaire	variation entre énergétique et substitution	Substitution, avec CAS soja modéré	variation entre énergétique et substitution
Emissions GES (kg éq. de CO₂ / MJ)	9,14E-02	3,73E-02	5,91E-02	58%	-2,61E-01	-800%	-6,09E-02	-263%	9,09E-03	-76%

8.1.4. SYNTHÈSE

Les tests réalisés autorisent à dire que les bilans des EMHV de colza présentés dans ce rapport sont assez robustes et cohérents face à d'autres approches sur les allocations (massique et économique). De ce fait, on estime que cette conclusion peut être étendue aux autres filières EMHV. Ainsi, on s'assure que la méthodologie retenue pour les allocations ne privilégie pas outre mesure le biodiesel.

Pour les éthanol, l'analyse de sensibilité faite pour l'allocation massique montre des résultats très comparables avec les résultats de l'allocation énergétique.

Enfin les résultats obtenus dans cette analyse de sensibilité par une approche par substitution simplifiée donne des résultats substantiellement différents, notamment liés à la prise en compte du changement d'affectation des sols pour certains produits substitués. Le type (et l'origine) des produits substitués peut donc avoir une influence significative sur le bilan des biocarburants. Hors prise en compte du CAS, les gains par rapport aux filières fossiles de référence seraient nettement réduits. En raison des multiples difficultés que cela pose, le travail méthodologique ayant abouti au référentiel 2008 avait pris le parti de ne pas recourir à cette voie pour les coproduits valorisés en alimentation animale

8.2. CHARGE ALLOUÉE AUX COPRODUITS ALIMENTAIRES

Ce paragraphe donne une synthèse des charges environnementales attribuées aux coproduits à destination de l'alimentation animale, plus simplement appelées « tourteaux » dans le texte suivant. L'intérêt de cet exercice est de pouvoir appréhender l'impact du choix des allocations conduites sur des coproduits au devenir identique. On s'aperçoit que les coproduits des filières éthanol ont des consommations d'énergie allouée supérieures à celles des coproduits issus des filières esters. Au sein de chaque famille de carburant, ces consommations sont relativement du même ordre de grandeur (exception faite du soja et de la palme, le premier ayant une quantité de tourteau très importante et le second portant une part des crédits de substitution énergétique).

Cette énergie semble élevée pour les drèches de blé, maïs, et betterave. Cependant, elle reste en deçà de l'énergie contenue dans le produit lui-même, et laisse donc penser qu'une autre valorisation que l'alimentation animale pourrait permettre de récupérer légèrement plus d'énergie que ce qu'il en a coûté pour produire ces coproduits (et ce même en intégrant l'énergie de séchage supplémentaire pour arriver à la matière quasiment sèche ayant le PCI proposé dans le tableau ci-dessous). Ces points sont d'ailleurs étudiés dans l'étude JEC. Avec une méthodologie légèrement différente (substitution des coproduits au lieu d'allocation), cette étude quantifie plusieurs types d'utilisation de ces coproduits et montre que, du point de vue strictement énergétique en sortie d'usine, les valorisations énergétiques de ces coproduits sont plus avantageuses pour le bilan global.

En revanche, elle souligne qu'économiquement, le marché de l'alimentation animale est plus intéressant, ce qui justifie l'utilisation actuelle.

En revanche, l'indicateur « émissions de GES » est plus variable du fait de la part importante de N₂O dans les émissions, très dépendante de la culture en jeu. Les données nécessaires à ces calculs sont communiquées ci-dessous. Deux exemples de valeur avec prise en compte du CAS direct et indirect pour le tourteau de soja sont proposés.

Tableau 149 – charges environnementales des coproduits

Charges environnementales allouées aux tourteaux	Charges affectées aux tourteaux	Energie non renouvelable	Potentiel émission de Gaz à Effet de serre	Energie non renouvelable		Potentiel émission de Gaz à Effet de serre	
				MJf/MJ biocarburant	Kg eq CO ₂ /MJ biocarburant	MJf/kg aliment	MJf/MJ aliment
betterave	Pulpes surpressées	3,61E-02	3,67E-03	8,39E-01	5,38E-02	8,55E-02	5,48E-03
blé	DDGS	4,23E-01	2,77E-02	1,08E+01	5,94E-01	7,09E-01	3,89E-02
maïs	DDGS	3,04E-01	2,25E-02	1,01E+01	5,54E-01	7,48E-01	4,10E-02
soja	tourteau	2,71E-01	2,45E-02	2,32E+00	1,35E-01	2,09E-01	1,22E-02
colza, EMHV	tourteau	1,41E-01	1,92E-02	3,88E+00	2,26E-01	5,27E-01	3,08E-02
colza, HVP fermier	tourteau	2,68E-01	3,77E-02	4,59E+00	2,26E-01	6,46E-01	3,18E-02
tournesol	tourteau	1,15E-01	1,12E-02	3,33E+00	1,94E-01	3,23E-01	1,88E-02
palme	tourteau	1,34E-03	5,52E-04	3,43E-01	2,00E-02	1,42E-01	8,28E-03
soja avec CAS direct modéré	tourteau		1,47E-01			1,26E+00	7,35E-02
soja avec CAS direct intermédiaire	tourteau		3,19E-01			2,73E+00	1,59E-01
soja avec CAS direct maximal	tourteau		8,10E-01			6,93E+00	4,04E-01

Tableau 150 – Quantités produites et charges environnementales des coproduits

Coproduits Alimentation Animale	Données génériques	% humidité	PCI	Quantité de tourteaux produite	Energie tourteaux	taux protéiques indicatifs
betterave	Pulpes surpressées	27,80%	15,6	1,15E+00	4,30E-02	
blé	DDGS	7,0%	18,225	1,05E+00	3,90E-02	0,3
maïs	DDGS	7,0%	18,225	8,06E-01	3,01E-02	
soja	tourteau	10%	17,1371	4,35E+00	1,17E-01	0,44
tourteaux de colza, industriel	tourteau	10%	17,1371	1,36E+00	3,65E-02	0,34
tourteaux de colza, fermier	tourteau	10%	20,3	1,36E+00	3,65E-02	0,34
tournesol	tourteau	10%	17,1371	1,29E+00	3,47E-02	
palme	tourteau	10%	17,1371	1,45E-01	3,89E-03	0,15

8.3. EFFETS DU NIVEAU DE MELANGE (E85 ET B30)

Les résultats du chapitre précédent sont présentés pour des niveaux d'incorporation de biocarburant représentant les carburants majoritaires des prochaines années (E10 et B10). Il s'agit d'étudier ici comment évoluent ces données pour des niveaux d'incorporation supérieurs.

Tableau 151 – Bilan comparatif entre E85 et E10 pour un éthanol de maïs

	Energie primaire non-renouvelable (MJf/MJ)	Emissions de gaz à effet de serre (kg eq CO ₂ /MJ)	Oxydation photochimique (kg eq C ₂ H ₄ /MJ)	Toxicité humaine (kg eq 1,4-DB /MJ)	Eutrophisation (kg eq PO ₄ ³⁻ /MJ)
Essence E0	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
cogénération, avec allocation, E10	0,575	3,98E-02	-6,32E-06	4,13E-02	3,79E-04
cogénération, avec allocation, E85	0,575	4,34E-02	2,58E-05	4,13E-02	3,79E-04
Ecart	0%	-9%	508%	0%	0%

Tableau 152– Bilan comparatif entre B30 et B10 pour un biodiesel de tournesol

	Energie primaire non-renouvelable (MJf/MJ)	Emissions de gaz à effet de serre (kg eq CO ₂ /MJ)	Oxydation photochimique (kg eq C ₂ H ₄ /MJ)	Toxicité humaine (kg eq 1,4-DB /MJ)	Eutrophisation (kg eq PO ₄ ³⁻ /MJ)
Gazole B0	1,25	9,14E-02	1,12E-05	4,12E-01	3,71E-05
moyenne, avec allocation, B10	0,401	2,51E-02	1,48E-05	-6,41E-01	3,89E-04
moyenne, avec allocation, B30	0,401	2,51E-02	1,54E-05	8,85E-02	3,85E-04
Ecart entre B10 et B30	0%	0%	-4%	croissant	1%

A la vue des résultats ci-dessus, on s'aperçoit que les trois paramètres suivants sont très sensibles aux émissions de l'étape véhicule (la seule étape qui change entre les deux), et peuvent venir modifier de manière non négligeable les résultats :

- ▶ pour les potentiels d'émissions de GES, seul le bilan de l'éthanol est modifié lors d'une incorporation à plus haut niveau d'après les hypothèses d'émissions prises. En effet, l'effet de réduction des émissions de CO₂ du carburant lors de l'incorporation d'oxygénés, plus fort proportionnellement à faible incorporation dans un E10 que dans un E85, est donc moins marqué dans ce dernier. Les 4,3 g eCO₂/MJ qui venaient alléger le bilan global des éthanol passent à 0,7 g eCO₂/MJ pour des niveaux d'incorporation à 85% d'éthanol. Une figure suivante donne les valeurs pour l'indicateur GES pour les E10 en incorporation directe. Cet effet sur les émissions globales de CO₂ est donc très sensible. Il illustre bien que ce correctif véhicule doit être lu comme un *ordre de*

grandeur plus qu'une valeur exacte, le niveau de la réduction d'émission lié à l'incorporation d'éthanol étant difficile à cerner et dépendant du niveau d'incorporation (voir l'analyse de sensibilité du chapitre suivant). Notons cependant pour être complet que cette modélisation n'intègre pas le léger gain de consommation que procure l'E85 notamment (estimé à quelques pourcents, et plutôt visible sur des conduites dynamiques), léger gain qui serait venu apporter une baisse sur le bilan par km parcouru en réduisant très légèrement les quantités d'éthanol à consommer et donc les émissions de la fabrication de l'éthanol.

- ▶ Le B30, en ne fournissant pas sur les HAP une réduction proportionnelle au taux d'incorporation par rapport à un B10, présente un avantage moindre par rapport à la filière diesel de référence lorsque ramené en MJ.
- ▶ Pour ces mêmes raisons de proportionnalité, la forte augmentation des émissions d'éthanol dans les émissions globales de COV pénalise l'E85 sur cet indicateur. L'E85 possède un potentiel d'oxydation photochimique d'un niveau légèrement supérieur à celui de l'essence. Cet écart est néanmoins très lié à la modélisation des émissions véhicule et au fait de regrouper les COVNM non quantifiés séparément dans une catégorie globale affectée d'un potentiel d'oxydation moyen. Il ne semble pas suffisant pour traduire un écart robuste entre essence et E85.

Les indicateurs énergie et eutrophisation ne sont pas impactés par ces changements dans cette modélisation.

Figure 62 – Bilan GES des éthanols incorporés dans E10 et E85, en incorporation directe

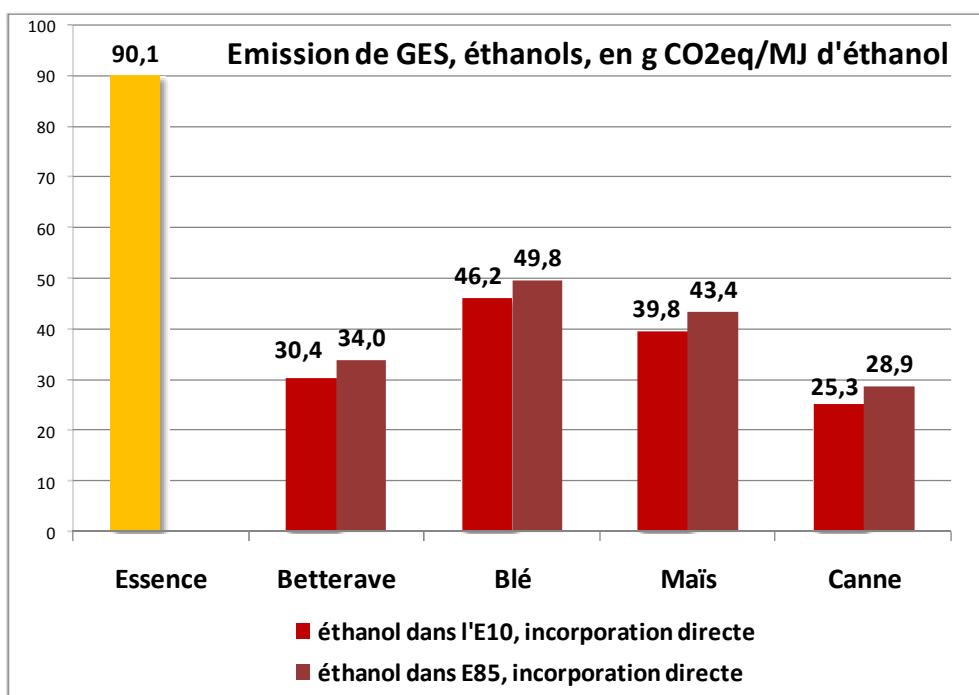


Tableau 153 – détail sur les étapes du cycle de vie des changements entre E10 et E85 : éthanol de maïs, indicateur GES

kg éq. de CO ₂ / MJ	TOTAL	AGRICOLE	INDUSTRIE L	TRANSPORT-DISTRIBUTION	VEHICULE
cogénération, avec allocation, E10	3,98E-02	2,57E-02	1,50E-02	3,51E-03	-4,35E-03
cogénération, avec allocation, E85	4,34E-02	2,57E-02	1,50E-02	3,51E-03	-7,49E-04
écart	-9%	0%	0%	0%	-83%

Cet élément ajoute à l'imprécision de l'indicateur, du même ordre de grandeur que l'incertitude sur les émissions N₂O du blé par exemple (+/- 4 g CO₂/MJ environ pour le blé).

8.4. ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LA REDUCTION D'EMISSION CO₂ VEHICULE DES ETHANOLS

La mesure exacte du niveau d'émission de CO₂ véhicule (ou de la consommation en carburant) présente un niveau d'incertitude qui justifie de présenter une analyse de sensibilité sur cet élément.

Tableau 154 – Analyse de sensibilité : émissions véhicule pour les éthanol

g CO ₂ émis/km	E0	E10	E85
Simulation sans effet « consommation »	164	163,6	155
Emissions utilisées dans les calculs principaux	164	163	154
Simulation avec baisse - de 0,9% telle que mesurée sur E10 - de 1 g/km (limite mesurabilité) sur E85	164	162,5	153

Tableau 155 – Résultats de l'analyse de sensibilité sur le CO₂ véhicule : éthanol de blé en incorporation directe

g CO ₂ émis/km	Résultat Total	Etape véhicule	Résultat Total	Etape véhicule
	E10	E10	E85	E85
Simulation sans effet consommation	50,6	0,0	50,6	0,0
Emissions utilisées dans les calculs principaux	46,2	-4,3	49,8	-0,7
Simulation avec baisse plus marquée	43,1	-7,4	49,7	-0,9

Les carburants E10 sont très sensibles à la mesure d'émission véhicule en raison de l'effet de levier dû leur faible niveau d'incorporation. L'E85 varie moins pour cette même raison.

8.5. ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LES ZONES GEOGRAPHIQUES ET PONDERATION ENTRE REGIONS

Les données ici présentées ont vocation à représenter la situation actuelle et moyennée de la France. La filière blé est probablement celle pour laquelle la construction de cette valeur doit être testée en priorité. En effet, comme expliqué au chapitre 4, la valeur présentée ici est le résultat pondéré des itinéraires techniques des 6 régions principales d’approvisionnement en blé des sites de production d’éthanol de blé. Manquant de l’ensemble des données des industriels, BIO a dû construire cette pondération qui est rappelée ci-dessous.

Tableau 156 – Part des régions dans la valeur moyenne de l’itinéraire technique « blé »

Type de pondération	Centre	Champagne-Ardenne	Haute-Normandie	Ile-de-France	Picardie	lorraine
Bassin d’approvisionnement (estimation BIO)	9%	22%	28%	10%	14%	17%
Poids dans la production totale des 6 régions	27%	21%	9%	10%	13%	19%

Deux tests ont été conduits. Le premier a consisté à faire les calculs à partir d’une autre pondération entre les régions, basée sur leur production totale en blé. Le second s’est attaché à regarder l’écart type des résultats entre les 6 régions. Le tableau suivant donne les variations sur les deux indicateurs Energie et GES. En raison du poids de la partie agricole dans le résultat sur les GES, la variabilité entre régions joue un rôle non négligeable dans le résultat, même si cette variation reste modérée et en deçà du niveau de précision lié à un facteur comme N₂O. En revanche, le test d’une modification de la manière de pondérer les différentes régions montre que cet effet est lissé dès qu’on utilise plusieurs régions comme bassin d’approvisionnement, comme c’est le cas pour le calcul d’une valeur moyenne française. L’impact du choix de la pondération sur le résultat est ainsi fortement réduit.

Tableau 157 – Résultats de l’analyse de sensibilité sur la part des régions dans le résultat « blé »

Ethanol de Blé	Energie primaire non-renouvelable (MJf/MJ)		Emissions de gaz à effet de serre (kg éq CO ₂ /MJ)	
	AGRICOLE (/kg grain)	TOTAL (/MJ)	AGRICOLE (/kg grain)	TOTAL (/MJ)
écart entre deux pondérations entre régions	4%	1%	4%	3%
écart type, entres les valeurs des 6 régions	9%	2%	10%	6%

Le même travail conduit pour la betterave conduit à des écarts encore plus faibles, les deux régions Champagne et Picardie étant plus proche dans leur niveau de production que dans le cas du blé.

8.6. LE CHANGEMENT D’AFFECTATION DES SOLS

Le changement d’affectation des sols (CAS) est traité par la présente étude en analyse de sensibilité. Les raisons et la manière de le réaliser ont été décrites en détail dans la partie méthodologique 4 du présent rapport. Une synthèse des résultats obtenus et les conclusions qui peuvent en être tirées figurent ici.

Il est rappelé que des exemples des calculs ayant conduit à estimer ces ordres de grandeur sont présentés dans les annexes (annexe 8) au présent rapport.

8.6.1. RESULTATS

8.6.1.1 Effets des changements directs

Les changements directs d'affectation des sols sont présentés au sein des fiches filière par filière. Ces résultats sont présentés à nouveau ci-dessous.

Figure 63 – impact potentiel du CAS direct pour l'EMHV de Palme

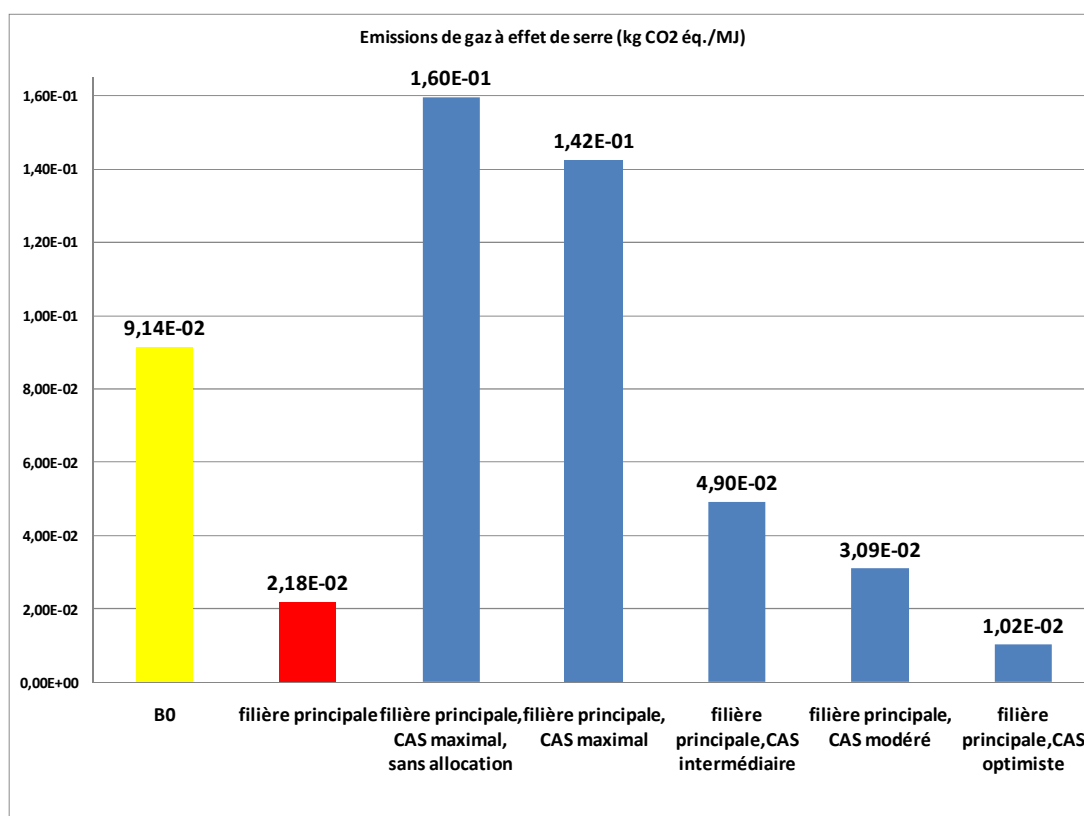


Figure 64 – rappel : impact potentiel du CAS direct pour l'éthanol de canne à Sucre

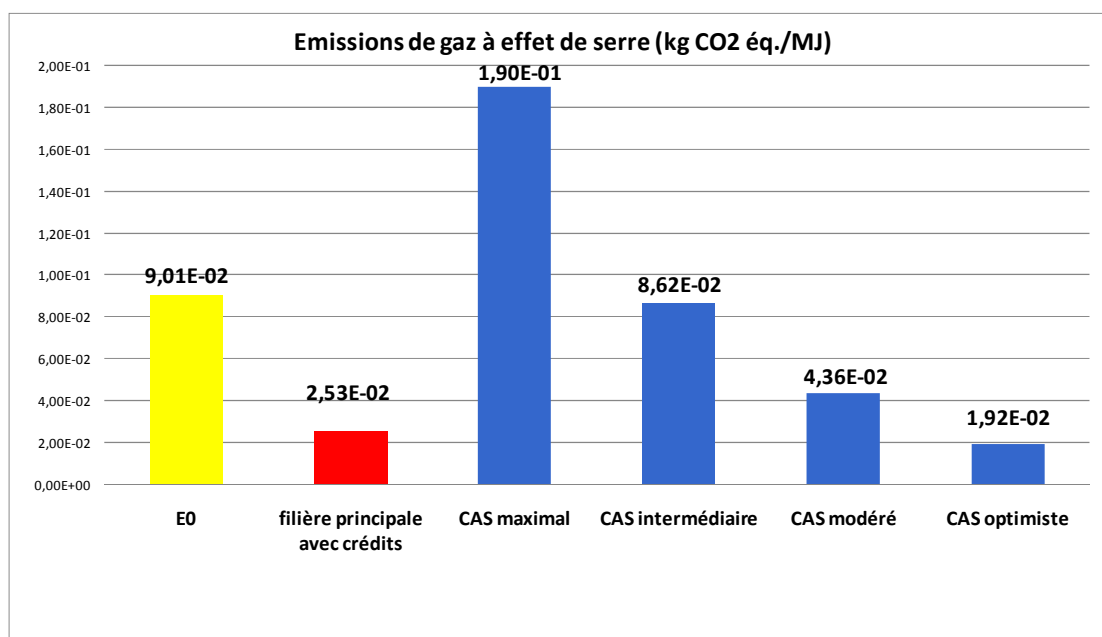


Figure 65 - rappel : impact potentiel du CAS direct pour l'EMHV de Soja brésilien

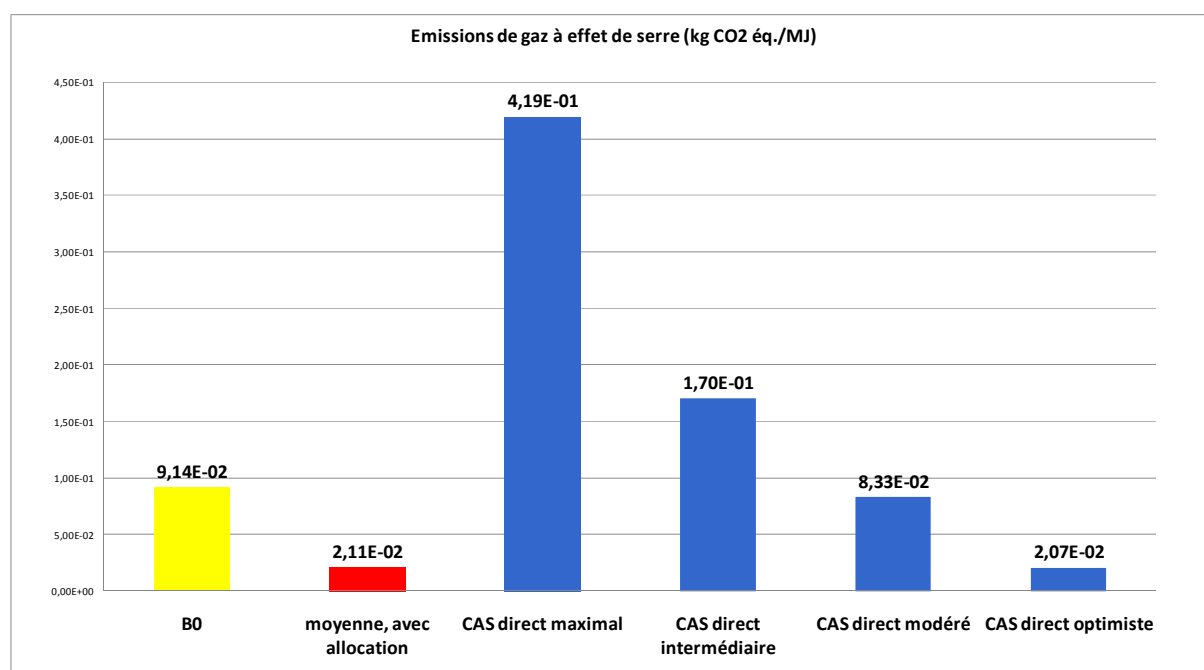
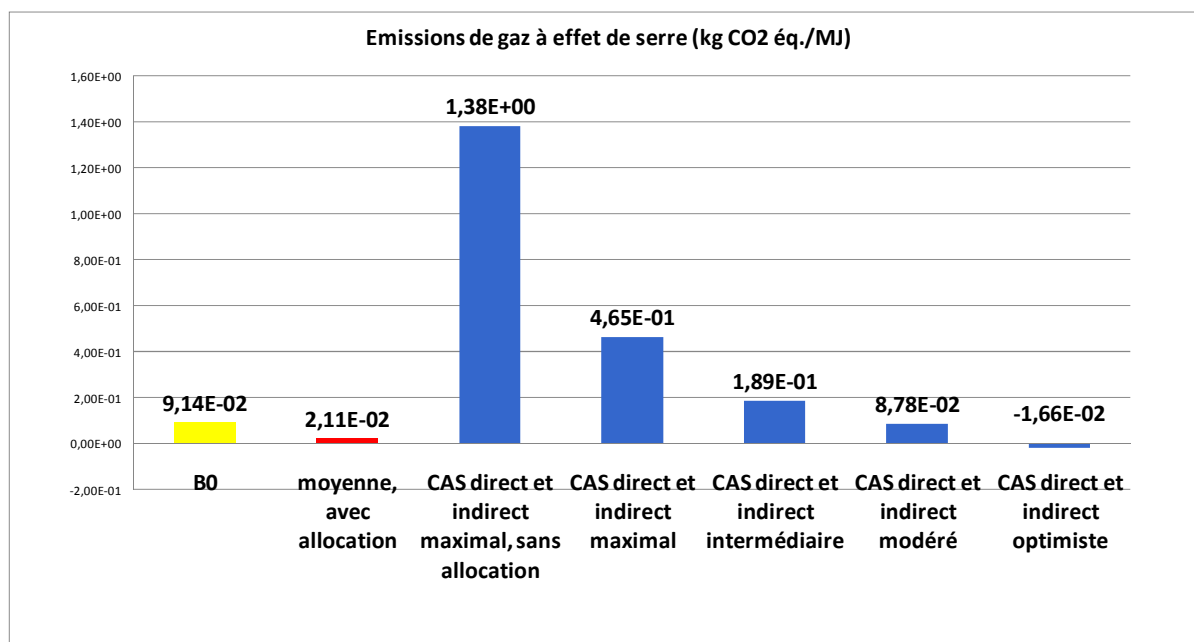


Figure 66 - Rappel : impact potentiel du CAS direct pour l'EMHV de Soja brésilien et indirect pour l'EMHV de Soja USA



Les émissions de GES pour le scénario CAS le plus pessimiste sont conséquentes, et font perdre aux filières leur caractère renouvelable (voir tableau ci-dessous). Pour la palme et la canne à sucre, les autres scénarii pessimistes leur laissent un gain par rapport à la filière fossile, mais le réduisent assez fortement. Le soja est quant à lui très fortement impacté par la prise en compte de ces émissions quels que soient leurs niveaux. Il faut un scénario modéré pour qu'il reprenne un léger avantage sur la filière fossile de référence.

Les scénarii optimistes montrent que des gains supérieurs peuvent être obtenus dans certaines conditions par ces cultures.

Le tableau suivant détaille les niveaux de CAS maximum ramenés à l'hectare utilisés, puis ramenés au MJ de biocarburant (en utilisant la valeur moyenne de rendement à l'hectare communiquée dans les tableaux de la partie 5 décrivant les filières).

Tableau 158 – Détail des niveaux de CAS maximal, ramené par MJ de biocarburant

	CAS MAXIMAL kg CO ₂ / ha	kg biocarburant /ha (valeur moyenne)	MJ/ha	CAS MAXIMAL kg CO ₂ /MJ
CAS INDIRECT				
Betterave	27 000	6 400	171 520	0,157
Blé	27 000	2 300	61 640	0,438
Colza	7 500	1 350	50 220	0,149
CAS DIRECT				
Soja	32 000	470	17 484	1,830
Palme	23 000	4 500	167 400	0,137

8.6.1.2 Effets des changements indirects

Au niveau des impacts indirects, deux analyses de sensibilité ont été conduites à partir des ordres de grandeurs précédents et sont présentées ci-dessous pour les filières EMHV de colza et éthanol de blé.

Comme pour les CAS directs et comme illustré dans le tableau précédent, les gains calculés sans prendre en compte ces effets indirects pourraient être entièrement annulés si venait à se réaliser la situation la plus pessimiste d'un transfert de production au détriment total des terres en forêt primaire. Les scénarii plus médians laissent un intérêt aux filières esters, mais leurs gains en sont cependant fortement réduits.

Du fait d'hypothèses fortes sur le remplacement d'un hectare de betterave par un hectare de canne prise sur forêt primaire, les valeurs introduites pour l'éthanol de betterave sont très fortes et ne permettent elles aussi de retrouver de faibles gains que pour des scénarii modérés.

Figure 67 - Analyse de sensibilité : Changement indirect d'affectation des sols, EMHV Colza, bilan émission de GES (kg eq CO₂/MJ)

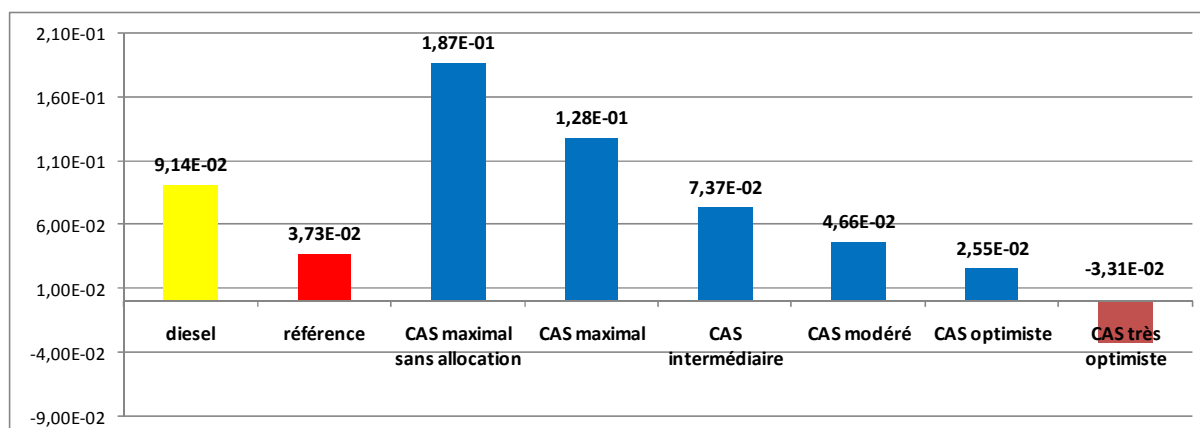
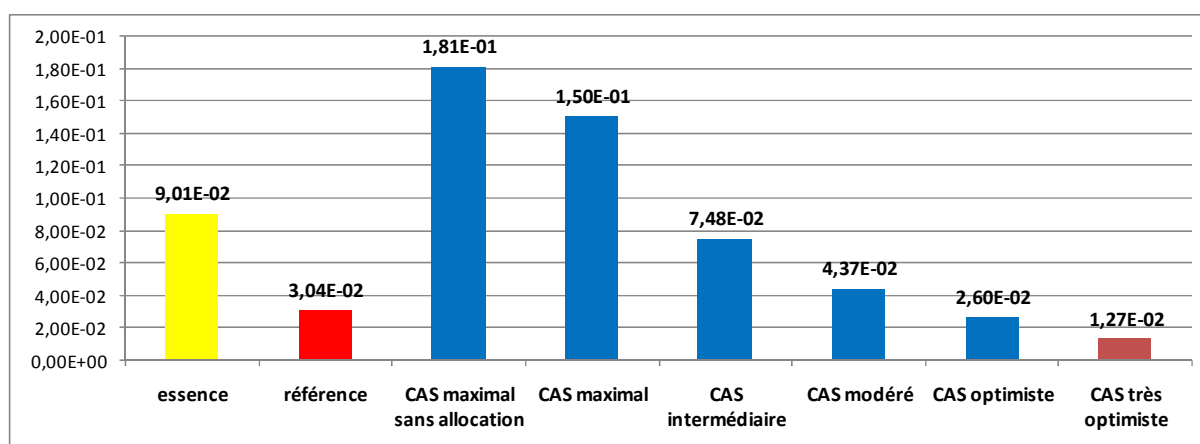


Figure 68 - Analyse de sensibilité : Changement indirect d'affectation des sols, Ethanol de Betterave, bilan des émissions de GES (kg eq CO₂/MJ)



8.6.2. DISCUSSION SUR CES ELEMENTS

Les résultats précédents illustrent la nécessité de répondre plus en détail à ces questions de changement d'affectation des sols, qui peuvent bouleverser plus ou moins fortement les bilans ici calculés. Les estimations de cette étude, basées sur des scénarii théoriques, semblent cependant globalement moins marquées que dans certaines études publiées sur le sujet et laissent même envisager un possible maintien des gains globaux, voire une amélioration.

Cette étude n'a cependant pas prétendu trancher les questions méthodologiques et quantitatives de la place des biocarburants dans la déforestation des dernières années et encore en cours. Les calculs proposés ici restent grossiers et ne visaient qu'à donner un ordre d'idée potentiel des effets que pourraient prendre ces éléments dans les bilans en balayant des scénarios très contrastés. Des travaux spécifiques doivent être conduits pour approfondir cette zone d'ombre et le degré de plausibilité des scénarios vis-à-vis des différentes filières étudiées.

Il s'agira notamment d'approfondir la connaissance du phénomène de déforestation, de valider les quantifications qui commencent à exister de la part des augmentations de rendement dans l'augmentation de la demande (les augmentations de rendement ayant semble-t-il fortement contribué à pallier aux augmentations de demandes en général), de clarifier les rôles de substitutions des coproduits animaux dans ces impacts, et enfin, la manière d'allouer aux biocarburants français leur part de responsabilité dans ces phénomènes mondiaux, multisectoriels et très liés aux décisions politiques.

8.7. EVOLUTIONS A 5 ANS DE CES BILANS

Les simulations faites du fonctionnement à cinq ans des sites étudiés quantifient les gains prévisibles des différents carburants. Ces valeurs sont à prendre comme des ordres de grandeurs issus des éléments connus à ce jour. L'intérêt de ces calculs ne réside pas tant dans la comparaison entre filière que dans l'estimation du gain global sur les biocarburants français. Comme expliqué dans le chapitre sur les filières, leurs principaux éléments concernent la mise en place de projets cogénération biomasse et des progrès divers pour les filières agricoles.

Les tableaux de synthèse des calculs pour chaque filière peuvent être retrouvés en annexe 1, § 2.2 et 2.3

➤ Filières fossiles

Les évolutions sur l'extraction et le raffinage du pétrole brut ayant été considérées comme négligeable dans les cinq prochaines années, les carburants fossiles ne bénéficient d'aucune amélioration prévisible intrinsèque. Seule l'amélioration moteur est prise en compte avec des consommations se réduisant (et les émissions afférentes) et la réglementation EURO5 imposant la réduction plus marquée sur certains polluants. Ce dernier point n'impacte que peu les émissions des véhicules ici modélisés car ces dernières étaient globalement déjà en deçà des seuils EURO5, sauf pour les émissions de NOx pour le diesel. Le gain de consommation attendu est important à souligner car les améliorations attendues par les constructeurs se chiffrent à 16% pour un diesel et à 21% pour une essence.

➤ Energie et potentiel d'émissions GES pour les biocarburants

Concernant les biocarburants, la filière éthanol pourrait s'améliorer de 15 à 20% dans son ensemble sur les deux indicateurs *consommation d'énergie non renouvelable* et *potentiel d'émissions de GES*,

ce qui permet d'atteindre des réductions moyennes de 60% et 70% par rapport aux filières fossiles sur ces mêmes indicateurs respectivement.

Avec les améliorations énergétiques prévues sur ces cinq prochaines années pour l'étape ETBE, l'éthanol incorporé sous forme d'ETBE pourrait atteindre des réductions de 35-45 % sur l'énergie et sur les potentiels d'émissions de GES par rapport à l'essence standard EURO5. Quelques différences existent en matière de progrès estimés entre les filières éthanol de betterave et de blé compte-tenu des projets connus à ce jour. Ces évolutions résident principalement dans les projets de cogénération biomasse ou de méthanisation, transformant les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ fossile en émissions d'origine renouvelable, et plus modestement de l'étape agricole, pour laquelle les progressions de rendement ont ralenti, voire sont stabilisés.

Les améliorations attendues pour les EMHV devraient quant à elles se situer autour de 10% sur ces deux indicateurs en raison d'un nombre plus restreint de projets de cogénération biomasse, et d'hypothèses de rendement stable sur les prochaines années. On atteindrait ainsi une réduction moyenne par rapport au carburant fossile d'environ 70% pour les biodiesels.

Tableau 159 – résultats prospectifs pour un éthanol de maïs sous forme d'ETBE, par MJ d'éthanol

Par MJ	Energie primaire non renouvelable (MJf)	Emission GES (kg eq CO ₂)	Oxydation photochimique (kg eq C ₂ H ₄)	Toxicité (kg eq 1,4-DB)	Eutrophisation (kg eq PO ₄ ³⁻)
Essence EURO 4	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Ethanol de maïs, sous forme ETBE, actuel	0,958	6,21E-02	-6,42E-06	3,93E-02	3,73E-04
Essence EURO5	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Ethanol de maïs, sous forme ETBE, prospectif	7,97E-01	5,23E-02	-5,07E-06	3,43E-02	3,57E-04
Ecart entre actuel et prospectif	35%	42%	+	-	-

Tableau 160 - résultats prospectifs pour un éthanol de blé sous forme d'ETBE, par MJ d'éthanol

Par MJ	Energie non renouvelable (MJf)	Emission GES (kg eq CO ₂)	Oxydation photochimique (kg eq C ₂ H ₄)	Toxicité (kg eq 1,4-DB)	Eutrophisation (kg eq PO ₄ ³⁻)
Essence EURO 4	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Ethanol de blé, sous forme ETBE, actuel	1	6,86E-02	-6,16E-06	4,91E-02	4,05E-04
Essence EURO5	1,22	9,01E-02	2,00E-05	2,05E-02	1,80E-05
Ethanol de blé, sous forme ETBE, prospectif	8,18E-01	5,70E-02	-4,39E-06	4,60E-02	3,07E-04
Ecart entre actuel et prospectif	33%	37%	++	-	--

➤ **Concernant les trois autres indicateurs**

Les trois autres indicateurs sont diversement impactés par ces évolutions.

L'indicateur oxydation photochimique augmente légèrement pour les éthanols du fait de l'étape industrielle et des émissions liées à la combustion de biomasse estimées plus émettrices que du gaz naturel en matières photo-oxydantes, que les gains sur l'étape agricole ne permettent pas de compenser (réduction des engrais et légère progression du rendement). Malgré la réduction de cet indicateur de 20%, cette évolution n'empêche pas ces filières de continuer à présenter un gain par

rapport au carburant fossile. Avec des taux d'énergie biomasse moindre, les effets agricoles l'emportent pour les biodiesels et imposent une très légère baisse de cet indicateur.

Les effets globaux sur le potentiel de toxicité sont globalement faibles voire nuls. Les réductions visibles sur la phase agricole avec la baisse des pesticides notamment sont compensées par une augmentation de la toxicité des émissions estimées de la cogénération biomasse.

Enfin, l'indicateur de potentiel d'eutrophisation s'améliore pour les biocarburants du fait d'une réduction prévue du lessivage. Cette amélioration se chiffre autour de 20 % avec des hypothèses de réduction par deux du lessivage des nitrates pour les cultures mettant en place des CIPAN. Elle atteint même 25 % pour les EMHV issus de cultures nationales du fait d'une réduction plus forte que proportionnelle sur les émissions véhicules (norme EURO5 sur les NOx). Malgré cela, les filières biocarburant restent plus impactantes que les filières fossiles pour cet indicateur.

8.8. EFFETS D'INCORPORATION

L'introduction de biocarburants se fait au sein d'une filière complexe et préexistante. Du fait d'équilibre de production et de caractéristiques légèrement différentes de ces produits, l'équilibre des raffineries peut ainsi être déplacé. Les consommations énergétiques ainsi que les émissions afférentes sont donc des paramètres potentiellement liés aux biocarburants.

Ces effets, que nous appellerons « effets d'incorporation », ont été assez peu étudiés. Seules quelques études s'y sont intéressées dont une étude du bureau DELFT en 2007. Elles montrent que le fait d'incorporer une base oxygénée comme l'ETBE, et dans une moindre mesure, l'éthanol, a un effet bénéfique sur la marche globale de la raffinerie qui, en baissant certaines spécifications dont la tension de vapeur, peut modifier certains équilibres et optimiser son fonctionnement en émettant légèrement moins de GES.

Un premier travail de simulation a été conduit par TOTAL afin de chercher à quantifier ces effets potentiels. Ces travaux sont malheureusement trop récents pour être intégrés pleinement dans les résultats de la présente étude. Ils nécessitent d'être poursuivis afin de confirmer les premières simulations sur l'ensemble des raffineries ou pour des situations variées. Surtout, il est nécessaire de répondre aux questions méthodologiques suscitées par ces premières approches (comment répartir des effets non linéaires ? sur quels produits ?).

Cependant, une synthèse de ces premiers travaux est proposée ci-dessous afin d'illustrer les effets potentiels.

8.8.1. DESCRIPTION DES SIMULATIONS REALISEES

L'objet de cette partie est de présenter les hypothèses et résultats des simulations effectuées par TOTAL&IFP en matière d'incorporation de biocarburants dans une raffinerie représentative de l'industrie du raffinage français. L'objectif des simulations est d'évaluer l'impact de l'incorporation de bases bio dans les pools essences et gazole de la raffinerie sur le fonctionnement de celle-ci. Cette évaluation repose en priorité sur l'analyse des modifications du bilan énergie et des émissions de CO₂ de la raffinerie, mais a requis de s'intéresser également à la composition du pool combustible comme à la marche des unités et aux changements dans le bilan entrées-sorties de la raffinerie.

Deux types de simulations ont été effectués à partir d'un modèle utilisant la programmation linéaire pour modéliser la raffinerie française type, estimée être une raffinerie de conversion classique et plus précisément avec un schéma FCC.

- ▶ Des calculs incrémentaux modélisant une réduction de la production de gazole ou d'essence. Ces évaluations ont servi à estimer l'impact des variations quantitatives de production des hydrocarbures (essence et diesel) dans le cas d'incorporation de biocarburants. Dans ces premières simulations, les spécifications des bases fossiles ne changent pas. Les variations de production sont toutes de 50 000 tonnes, pour ne pas risquer de trop perturber les autres productions de la raffinerie.
- ▶ Un deuxième jeu de simulation a ensuite été conduit en considérant à la fois cette réduction quantitative, mais aussi le changement global qu'introduit le fait d'avoir à créer des bases fossiles compatibles avec les oxygénés pour passer les spécifications finales.

L'hypothèse d'une baisse de la production d'essence et de diesel fossile alors que la France importe une partie de sa consommation peut être critiquée. Cette critique est recevable, mais il faut bien imaginer que cette baisse aura de toute façon probablement lieu quelque part. Ne disposant pas de modèles autres que celui des raffineries françaises, il a été décidé de commencer les réflexions par ces simulations.

Dans ce cadre, 5 cas ont été étudiés qui peuvent être distingués en deux groupes. En respect de la législation en vigueur en France, le premier groupe intègre 2 cas d'incorporation simultanée de bases essences et gazole d'origine renouvelable (pour tout ou partie), soit éthanol&EMHV et ETBE&EMHV. Le second groupe de simulations considère quant à lui des incorporations individuelles de chacune des bases alternatives envisagées, soit éthanol, ETBE et EMHV pris séparément, afin de mettre en évidence certains résultats qu'il était difficile de mettre en évidence dans le cadre des simulations du 1^{er} groupe (incorporation simultanée). Dans ce cadre, les taux d'incorporation considérés sont les suivants :

- ▶ - cas simultanés = incorporation simultanée des bases carburants alternatives, soit :

15&7% vol. d'ETBE&EMHV ; 7&7% vol. d'éthanol&EMHV

- ▶ - cas individuels = incorporation séparée des bases carburants alternatives, soit :

15% vol. d'ETBE ; 7% vol. d'éthanol ; 7 % vol. d'EMHV

Enfin, il faut souligner le fait que ces différentes simulations ont été réalisées selon l'approche dite **iso énergie**, qui impose l'invariance des quantités produites d'essence et de gazole exprimées en équivalent énergie (GJ/an). Dès lors, les demandes (productions cibles) d'essence et gazole imposées en Mt/an à la raffinerie considérée sont les suivantes selon les cas étudiés :

Cas Produit	Base	15 % ETBE	7 % Ethanol	7 % EMHV	15 % ETBE 7 % EMHV	7 % ETOH 7 % EMHV
Essence	1,520	1,555	1,555	1,520	1,555	1,555
Gazole	3,025	3,025	3,025	3,046	3,046	3,046

Unité : Mt/an

8.8.2. PREMIERES CONCLUSIONS POTENTIELLES DE CES SIMULATIONS

L'analyse comparative des résultats des 5 cas au cas de base a mis en évidence les grandes conclusions suivantes :

- ▶ les cas individuels ont permis de mettre en évidence qu'il n'y avait pas additivité des impacts d'incorporation des bases biocarburants au sens où l'impact de l'incorporation simultanée de deux bases biocarburants n'égale pas la somme des impacts respectifs de l'incorporation individuelle de chacun. Quelle que soit la combinaison de bases biocarburants incorporée, l'impact est positif dans le sens d'une réduction des émissions de CO₂ par rapport au cas individuel le moins émetteur. Ainsi, de 1,811 Mt/an en base, les émissions de CO₂ sont réduites à 1,742 Mt/an avec ETBE seul puis à 1,721 Mt/an si adjonction supplémentaire d'EMHV. De même, le cas éthanol seul induit 1,816 Mt/an de CO₂ et seulement 1,796 Mt/an après adjonction d'EMHV.
- ▶ quel que soit le mode d'incorporation et la nature des bases biocarburants incorporées aux pools essence et gazole de la raffinerie, cela lui permet de réduire son traitement de bruts et, consécutivement, la charge de certaines des unités majeures (reformage et FCC dans tous les cas et aussi HDS de gazole dans les cas avec EMHV) et, au final, la consommation d'énergie (exprimée en GJ).
- ▶ en revanche, le niveau d'émissions de CO₂ ne varie pas uniformément à la baisse dans tous les cas étudiés relativement au cas de base, du fait d'une modification de la composition du pool combustible induite par les changements d'opération des unités cités plus haut. Plus précisément, il existe un cas où les émissions de CO₂ augmentent par rapport à leur niveau de base : c'est le cas individuel EMHV.
- ▶ dans tous les cas, la raffinerie accroît sa production de butane jusqu'à ne plus avoir besoin de recourir à une importation pour satisfaire sa demande. Dans les cas d'incorporation de bases bioéthanol, cela tient à la substitution dans le pool essence de ces bases aux coupes C4 qui sont alors "libérées". Dans les cas avec EMHV (individuel ou simultané), cela tient à un accroissement de production de ces coupes C4 au FCC consécutif au basculement de sa marche de la sévérité "Max. Distillat" vers la sévérité "Max.Essence", qui offre davantage de rendements en essence mais aussi en coupes butane.
- ▶ dans tous les cas, la raffinerie réduit sa production de fuels lourds du fait du moindre traitement de bruts.

8.8.3. ORDRE DE GRANDEUR POTENTIEL DE CES EFFETS

Ces simulations à l'échelle d'une raffinerie ont permis de calculer des évolutions d'émission et de consommations énergétiques au niveau de la raffinerie. A partir de là, il a été cherché comment allouer ces effets à une unité de la perturbation, à savoir le biocarburant. Une approche de premier niveau a été menée :

- ▶ **Déduire de ces évolutions globales, l'écart lié aux aspects quantitatifs à partir de la première simulation purement incrémentale sur les quantités fossiles produites.**
- ▶ **Puis considérer que les écarts restant sont à allouer aux biocarburants introduits, après avoir vérifié qu'il n'y a pas d'écarts majeurs sur les quantités produites d'autres dérivés pétroliers. Cette hypothèse est la plus forte et méritera un travail plus poussé pour être validée.**

Ce travail aboutit aux résultats rassemblés dans le tableau ci-dessous. **Compte-tenu de tous les éléments évoqués auparavant, ils ne doivent être perçus qu'en tant qu'ordres de grandeur potentiels de ces effets.**

L'ETBE apparaît comme l'oxygéné ayant le rôle le plus favorable individuellement. Il semble aussi présenter un léger avantage en mélange en termes d'émission de CO₂. En matière d'ordre de grandeur, l'effet individuel pourrait venir compenser les émissions et consommations énergétiques de cette étape supplémentaire (respectivement 22g CO₂/MJ éthanol et 0,38 MJf/MJ éthanol). Mais il est plus probable que le fonctionnement moyen des raffineries sera d'incorporer conjointement des esters, et l'effet devient moins marqué dans ce cas là. Cet effet serait de plus à répartir entre éthanol et esters.

Tableau 161 – ordres de grandeur potentiels des effets d'incorporation sur les raffineries

Biocarburant introduit dans la simulation :	15% ETBE	7% éthanol	7% EMHV	15% ETBE & 7% d'EMHV	7% éthanol & 7% d'EMHV
MJf/MJ éthanol ou Ester	-0,53	-0,067	-0,08	-0,12	-0,062
g CO ₂ /MJ éthanol ou Ester	- 54	- 6	- 17	- 13	- 2

Ces valeurs ne sont pas à utiliser en l'état. Trop d'hypothèses non validées sont nécessaires pour les mener à bien. Leur objectif était seulement de pouvoir montrer que ces changements pourraient jouer un rôle non négligeable dans le bilan du « champ à la roue » des biocarburants.

Ce travail mérite d'être poursuivi pour valider l'existence de ces effets plus largement, et apporter les réflexions méthodologiques nécessaires pour savoir ce qu'il convient d'imputer aux biocarburants et comment le faire.

9. ANALYSE COMPARATIVE

Les résultats précédents donnent des niveaux d'impact quantifiés incitant à des comparaisons directes. Cet exercice peut s'avérer dangereux s'il n'est pas conduit avec la vigilance nécessaire à tout résultat d'ACV. Ainsi, il a été estimé utile de proposer des bases et points de vigilance nécessaire à ce genre de comparaison. Les présents résultats sont ainsi mis en perspective à l'aune des choix de modélisation et des limites inhérentes à ces derniers.

Cette ACV porte sur un domaine où de nombreuses analyses de cycle de vie ont déjà été conduites, en général sur les indicateurs consommation d'énergie non renouvelable et potentiel d'émissions de gaz à effet de serre. Des ordres de grandeur se dessinent déjà à travers elles. La Directive Energie Renouvelable a fixé ses niveaux par défaut et ses valeurs types. Il est intéressant dans ce contexte de positionner cette étude par rapport à un choix d'études antérieures. Deux ont été choisies pour ce travail : l'étude ADEM-DIREM de 2002, première grande étude française sur un large éventail de filières, et l'étude JEC et plus précisément, sa mise à jour 2008. Les résultats disponibles ont été déjà présentés au sein des fiches par filières.

Une synthèse de cette comparaison est dressée en première partie de ce chapitre. Les valeurs GES de la directive ont été rajoutées aux autres études mises en parallèle. Puis une tentative d'analyse des origines des écarts est conduite. Ce travail est rendu difficile par la multiplicité des éléments entrant en ligne de compte dans le calcul. Malgré la transparence des deux études choisies sur les hypothèses de calcul, reconstituer leur calcul exact est un travail quasiment impossible. Ce sont donc plutôt des hypothèses qui sont formulées ici à partir des éléments disponibles.

9.1. SYNTHESES DES COMPARAISON ENTRE ETUDES

De cette comparaison se dégagent les tendances suivantes :

9.1.1. SUR L'INDICATEUR CONSOMMATION D'ENERGIE NON RENOUVELABLE

Toutes les valeurs disponibles après allocation dans l'étude ADEME-DIREM sont en dessous des résultats ici présentés. Cet écart se situe entre -20 à -30 %. Cela est aussi vrai pour les filières fossiles de références, mais avec un écart plus réduit (-6 % pour l'essence et -14 % pour le diesel). Les étapes industrielle et transports-distribution en sont les causes principales. Un écart notable (-35 %) s'y ajoute pour la seule filière blé sur la partie agricole. Cela n'est pas si tranché avec l'étude JEC (données après substitution en raison des coproduits), pour laquelle quatre filières sont plus consommatrices d'énergie que la présente étude (blé, canne à sucre, palme, et soja), en raison de consommations d'énergie plus élevées pour les étapes industrielle et transports.

9.1.2. SUR L'INDICATEUR GAZ A EFFET DE SERRE

L'étude JEC propose des valeurs d'émission au MJ de carburant produit chaque fois légèrement plus élevées que cette étude, voire vraiment au dessus pour certaines filières (soja, canne à sucre). Une seule filière, le tournesol, se trouve être de niveau équivalent. Les écarts portent sur l'étape agricole principalement et l'étape industrielle du fait d'une approche par substitution pour les tourteaux et non par allocation. Ce point sera détaillé ultérieurement. Les résultats GES de l'étude ADEME-DIREM

sont pour certains plus forts que ceux de cette étude (betterave), et pour la majorité en dessous des niveaux calculés. Les étapes agricole et industrielle souvent plus faibles expliquent ces écarts. Là aussi, il est important de garder à l'esprit que plus que les valeurs absolues, ce sont les réductions par rapport aux carburants de référence qu'il faut observer. Les différences de méthodologies, d'inventaires portent aussi sur les filières fossiles de référence, notamment pour le diesel pour lequel les émissions de GES par MJ de cette étude sont plus élevées que dans les études utilisées pour la comparaison.

Tableau 162 – rappel des réductions estimées sur les potentiels d'émissions de GES pour les trois études par rapport aux filières fossiles de référence respectives.

réduction émission GES	BIO 2009	JEC	ADEME-DIREM
Ethanol de betterave	66%	56%	65%
Ethanol de blé	49%	30%	64%
Ethanol de maïs	56%	Non traité	Non traité
Ethanol de canne à sucre	72%	72%	Non traité
EMHV de colza	59%	53%	76%
EMHV de tournesol	73%	70%	81%
EMHV de soja	77%	17%	Non traité
EMHV de palmier à Huile	76%	45%	Non traité

9.1.3. PAR RAPPORT A LA DIRECTIVE 2009/28/CE

Les deux tableaux ci-dessous présentent une mise en parallèle avec les valeurs de la Directive Energie Renouvelable. Il convient de noter que pour réaliser cette comparaison, l'étape véhicule n'a pas été intégrée pour les valeurs des éthanol de la présente étude, la Directive ne prenant pas a priori cette étape là en ligne de compte.

Les valeurs pour les EMHV sont toutes en dessous des seuils par défaut et des valeurs types de la directive et ce de manière globale comme étape par étape. La valeur pour la phase agricole passe juste sous la barre pour le colza et le tournesol, alors que la valeur obtenue pour l'étape industrielle est supérieure à celle donnée par la directive. En revanche, les résultats des calculs réalisés ici placent les filières éthanol au dessus des valeurs types, notamment en raison d'une étape agricole plus pénalisante (blé et maïs), et dans une moindre mesure, d'une étape industrielle avec une valeur légèrement supérieure à celle de la directive. Mais les résultats obtenus pour l'ensemble du cycle de vie restent sous le seuil des valeurs par défaut. La valeur de l'étape « transports » est légèrement supérieure à la valeur type, ce qui sera analysé un peu plus loin.

Tableau 163 - Comparaison avec les valeurs proposées par la directive, totaux

(g eq CO ₂ /MJ)	Directive Energies Renouvelables		ACV BIO IS 2009
	valeurs types	valeurs par défaut	Valeurs étude, Sans prendre en compte l'étape « véhicule »
Éthanol de betterave	33	40	34,8
Éthanol de blé	46	55	50,6
Éthanol de maïs, produit dans la Communauté	37	43	44,1
Éthanol de canne à sucre	24	24	29,7
Bio gazole de colza	46	52	37,3
Bio gazole de tournesol	35	41	25,1
Bio gazole de soja	50	58	21,1
Bio gazole d'huile de palme	54	68	21,8
Bio gazole d'huile végétale ou animale usée	10	14	8,4
Huile végétale pure, colza	35	36	31,8

Tableau 164 – Comparaison avec les valeurs proposées par la directive, détail

(g eq CO ₂ /MJ)	Directive Energie Renouvelable				ACV BIO IS 2009		
	Etape agricole	Transform. industrie	Transform. industrie	Transport et distribution	Etape agricole	Transform . industrie	Transport et distribution
	valeurs types	valeurs types	valeurs par défaut	valeurs types			
Éthanol de betterave	12	19	26	2	8,9	22,5	3,3
Éthanol de blé	23	21	30	2	27,9	19,2	3,5
Éthanol de maïs, produit dans la Communauté	20	15	21	2	25,7	15,0	3,5
Éthanol de canne à sucre	14	1	1	9	24,0	-0,6	6,3
Bio gazole de colza	29	16	22	1	28,7	7,1	1,5
Bio gazole de tournesol	18	16	22	1	16,7	6,9	1,5
Bio gazole de soja	19	18	26	13	11,0	5,8	4,4
Bio gazole d'huile de palme	14	35	49	5	12,0	4,2	5,7
Bio gazole d'huile végétale ou animale usée	0	9	13	1	0,0	7,7	0,7
Huile végétale pure, colza	30	4	5	1	31,5	0,3	0,0

9.2. ANALYSES DES ECARTS

Afin de structurer ce regard critique, quatre paramètres fondamentaux de possibles divergences ont été passés en revue :

- ▶ Les valeurs calculées pour les filières de référence
- ▶ Les données d'entrée utilisées
- ▶ Les inventaires et les facteurs d'impact choisis
- ▶ La méthodologie choisie et les impacts dans le calcul obtenu

Ce dernier point est sans doute le plus délicat à quantifier et complexifie cette analyse. Une comparaison détaillée de l'ensemble des filières n'est pas envisageable, seules sont mises en avant les grandes lignes d'écart qui semblent se dessiner et quelques illustrations de l'impact de ces différences.

9.2.1. VALEURS CALCULEES POUR LES FILIERES DE REFERENCE

Lorsqu'on parle de réduction, on est bien dans une logique de comparaison. Le niveau des filières de référence entre donc en ligne de compte de prime abord.

Un travail d'analyse comparée des valeurs utilisées a été conduit dans le paragraphe 6.1 de présentation des résultats des filières fossiles. Le tableau qui en a été dressé faisait état d'écarts entre les différentes études, le présent travail proposant les valeurs les plus élevées. Il a pu être constaté que l'écart provenait principalement de la partie extraction, et donc de la modélisation et des sources de données utilisées pour quantifier cette étape fondamentale du cycle de vie des carburants pétroliers.

Ainsi l'on peut dire que les écarts sur ce paramètre reposent en fait sur les inventaires et sur les choix méthodologiques qui sont derrière eux (intégration des amortissements ? règles d'allocation ? quels flux prendre en compte ?).

9.2.2. REGARD SUR LES DONNEES D'ENTREE

Un travail de mise en relation des données d'entrée a été mené. Il en ressort les grandes lignes suivantes :

Dans l'ensemble, les données d'entrée agricoles sont assez proches, qu'il s'agisse de données de rendement ou de consommations (engrais, phytosanitaires, mécanisation). La donnée rendement grains/ha est l'une des plus sensibles car c'est d'elle que dépendra la répartition de l'ensemble des charges amont. Sur ce point, les études sont assez proches, à l'exception de la filière blé, pour laquelle l'étude JEC 2008 considère un rendement moyen de 52 qt/ha et l'étude ADEME-DIREM un rendement de 90 qt/ha, cette étude se situant entre les deux à 77 qt/ha. L'écart évoqué précédemment entre cette étude et l'étude ADEME-DIREM pour cette filière trouve ses raisons dans cette différence de rendement, et ce d'autant plus que le premier poste de l'étape agricole, les apports d'azote, est très proche (respectivement 184 et 174 kg N/ha). A ceci s'ajoute un facteur d'émission de protoxyde d'azote très bas pour le blé en raison du modèle utilisé (0,8 % du N apporté). Un écart de rendement de -25 % existe aussi entre cette étude et l'étude JEC, expliquant une partie de la différence entre ces études. Sur le reste des paramètres, et notamment l'azote, la

mécanisation, les intrants pris en compte, il n'y a pas de différences notoires (on peut signaler des émissions N₂O plus élevées pour le soja dans l'étude JEC).

Ce même travail est plus délicat à conduire sur les étapes industrielles car les données sont moins directes pour l'étude ADEME-DIREM. Sur le point clé des rendements de conversion (kg de biocarburant/kg de grains entrés), il ne semble pas exister d'écarts majeurs en général, même si la filière betterave modélisée ici paraît légèrement plus efficace que dans l'étude JEC. A part la filière betterave, très proche de cette étude, les données de conversion accessibles en part 2 du rapport ADEME-DIREM ne sont pas exploitables pour cette comparaison. Sur la partie énergie, des écarts modérés existent, notamment pour les éthanol, les valeurs de cette étude étant plus élevées. Il semble cependant que plus que la technologie, ces écarts mesurés après allocation sont issus des règles méthodologiques mettant en place cette allocation et de l'impact d'inventaires plus forts dans cette étude (voir partie ci-dessous).

Soulignons que les données transports en t.km estimées (car non directement disponibles) des deux études de référence apparaissent bien plus faibles que celles prise en compte par cette étude. A titre d'exemple, l'étude JEC donne des valeurs de 0,0044 et 0,0028 tkm/MJ de carburant pour les EMHV et éthanol respectivement pour le transport aval pour l'utilisateur, ce qui correspondrait dans les deux cas à 160 km. Cette étude est plus proche des 400 km en moyenne, dont au moins 100 km de camion pour aller du dépôt à la station service en moyenne (données IFP). Aussi, la partie dépôt-distribution, valeur issue de l'étude JEC et incluse dans l'étape « transport-distribution » et comprenant l'électricité de ces sites, est prêt de 10 fois plus importante que celle estimée dans l'étude ADEME-DIREM.

Enfin, il peut exister des différences au niveau des données génériques sur les produits dont principalement le PCI. On peut remarquer que l'étude de 2002 prend une valeur de 37,39 MJ/kg EMHV contre 37,2 dans cette étude. Cet écart, même faible participe aussi à créer des différences.

On peut dire que les écarts sur les jeux de données d'entrée ne sont pas si importants que cela dans l'ensemble à quelques exceptions près. Pour faire la part des choses, il est nécessaire de regarder du côté des valeurs d'émissions affectées aux intrants et sur la méthodologie.

9.2.3. LES INVENTAIRES UTILISES

Les valeurs utilisées pour les inventaires de cycle de vie sont fondamentales. En venant donner pour les intrants mobilisés un impact environnemental lié à leur fabrication et à leur utilisation (combustion de gaz naturel), ils influencent de manière non négligeable les résultats de toute ACV.

Une analyse comparée des trois études sur ce point est présentée dans le tableau ci-dessous pour les produits majeurs en terme d'énergie non renouvelable consommée et de GES. Ce travail met en lumière le fait que cette étude a affecté des charges amont aux intrants bien plus importantes que ce fut le cas pour les deux études de référence.

Ainsi, la consommation d'énergie non renouvelable par MJ de gaz naturel brûlé est globalement de 10 à 15% plus élevée dans cette étude, l'électricité dépasse quant à elle les 15% par rapport à l'étude JEC. De même, les transports présentent des écarts de l'ordre de 20 à 40%¹⁹, voire même plus pour le train. Cela est aussi visible sur le méthanol, bien plus faible pour l'étude JEC par exemple mais aussi plus légèrement pour l'étude ADEME-DIREM. Le méthylate de sodium, plus consommateur que la soude, est le produit modélisé pour toutes les filières d'EMHV ici calculées.

¹⁹ Il convient de noter que la valeur donnée pour le transport par camion de l'étude BIO IS 2009 intègre un retour à vide, ce qui n'est le cas de celles mentionnées pour les 2 autres études. Mais la conversion couramment pratiquée d'un retour à vide consommant 30% de moins qu'à pleine charge montre qu'un écart de 20% existe toutefois.

Les raisons de ces écarts peuvent être multiples, les inventaires étant des analyses de cycle de vie pour lesquelles le travail a été arrêté à la collecte et au calcul des flux de molécules. Mais on peut souligner que la base de données ECOINVENT propose des inventaires très complets, intégrant des analyses poussées des filières. Chaque inventaire est construit lui-même à partir d'autres inventaires, cumulant ainsi tel qu'il se doit les effets indirects de mobilisations de matière ou d'énergie. Aussi, les inventaires utilisés intègrent tous une partie amortissement énergétique et entretien pour les transports. En effet, même s'il a été choisi de ne pas modéliser ces amortissements pour les sites industriels et pour le matériel agricole, les autres intrants sont à modéliser avec ces amortissements autant que faire se peut.

Tableau 165 – valeurs comparées des inventaires clés utilisés

Intrant	BIO IS 2009		JEC		ADEME-DIREM	
	Energie primaire non renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre	Energie primaire non renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre	Energie primaire non renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre
	(MJ)	(kg éq. de CO ₂)	(MJ)	(kg éq. de CO ₂)	(MJ)	(kg éq. de CO ₂)
PRODUITS CHIMIQUES						
acide sulfurique 98% /kg	2,33	1,37E-01			1,82E+01	1,48E-01
hexane /kg	58	9,15E-01			2,25E+01	3,13E-01
méthanol /kg	38,5	7,91E-01	4,67E-01	1,17E-02	3,29E+01	5,21E-01
méthylate de sodium /kg	114	4,88				
soude 50% /kg	24,2	1,12			9,1	5,87E-01
PRODUITS AGRICOLES						
engrais N minéral /kg	54,3	5,28	4,92E+01	6,07	4,84E+01	3,98
engrais P ₂ O ₅ /kg	9,67	5,71E-01	1,55E+01	1,02		
produits phytosanitaires /kg	217	7,71	2,73E+02	1,73E+01		
TRANSPORT						
transport par camion /tkm	2	1,16E-01	1,13	8,51E-02	9,49E-01	7,59E-02
transport par train /tkm	0762	3,92E-02			2,30E-01	1,30E+01
transport maritime /tkm	1,62E-01	1,07E-02	2,20E-01	1,78E-02	1,00E-01	8
transport fluvial /tkm	6,30E-01	4,63E-02	5,00E-01	3,78E-02	5,10E-01	4,10E+01
ENERGIE						
électricité /MJe	3,33	2,62E-02	2,83	1,7E-02	2,81	3,65E-02
gaz naturel, combustion chaudière /MJ	1,2	6,80E-02	1,03	5,86E-02	1,07	6,45E-02

9.2.4. LA METHODOLOGIE CHOISIE

Enfin, dernier grand paramètre influençant le résultat, la méthodologie est bien entendu potentiellement une source d'écart entre approches. Sans entrer dans le détail de chacun point de méthodologie, trois points semblant primordiaux sont rappelés ci-dessous.

➤ Protoxyde d'azote

Il a déjà été fait état des différences de modélisation des émissions de N₂O. Le tableau ci-dessous synthétise les écarts sur ce paramètre clé et illustre le besoin de poursuivre les travaux sur la connaissance de ces émissions. Ces facteurs sont utilisés dans l'étude.

Tableau 166 – Facteurs d'émission de N₂O

	ADEME/DIREM 2002	JEC	BIO IS 2009
	Méthode SKIBA : % de l'apport de N émis sous forme de N ₂ O	Modèle DNDC : valeur calculée par hectare, ramené à la tonne produite	Approche type GIEC (inclus l'azote des résidus), actualisation France de certaines données
Blé	0,5%	Equivalent à 1,05% du N apporté	Equivalent à 1,5% du N apporté
Betterave	1,6%	Equivalent à 1,75% du N apporté	Equivalent à 2,2% du N apporté
Colza	0,5%	Equivalent à 1,43% du N apporté	Equivalent à 1,5% du N apporté
Tournesol	0,8%	Equivalent à 2,34% du N apporté	Equivalent à 2,7% du N apporté

➤ Gestion des coproduits

Le deuxième élément clé de la modélisation repose sur les choix faits en matière de gestion des coproduits. **L'étude ADEME-DIREM s'appuie principalement sur des allocations par prorata massique, avec quelques extensions de systèmes.** En procédant ainsi, l'allocation supportée au biocarburant est plus faible que celle retenue ici. On peut noter aussi que les pailles reçoivent dans l'étude de 2002 4% des charges amont. **L'étude JEC privilégie quant à elle la substitution des coproduits principaux produits lors de l'étape de transformation industrielle²⁰. C'est pourquoi, en ne faisant porter aucune charge par allocation de l'étape agricole, les niveaux calculés pour cette étape sont toujours supérieurs à ceux de cette étude qui a privilégié une approche par allocation.** La comparaison des valeurs sans allocation de cette étude avec celles de l'étude JEC montre un niveau de proximité plus grand. Même s'il manque des éléments pour vraiment quantifier la valeur prise pour cette substitution, le résultat semble être moins favorable que les allocations pratiquées. Ainsi, à titre illustratif, la substitution d'un kilogramme de tourteau de colza par 0,4 kg tourteau de soja + 0,479 kg blé fourrager ne compense pas une allocation de l'ordre de 35% des impacts de l'étape agricole amont.

Tableau 167 – comparaison des allocations des charges de l'amont agricole

Part de l'amont agricole alloué au biocarburant	ADEME/DIREM 2002	JEC	BIO IS 2009
EMHV de tournesol	49%	100%	65%
EMHV de colza	46%	100%	64%
Ethanol de blé	43%	100%	65,2%
Ethanol de betterave	80%	100%	80%

➤ Intégration de la partie véhicule

Comme on l'a vu dans l'analyse des résultats, la prise en compte de mesures réelles d'émission en sortie d'échappement a introduit un effet véhicule pour les éthanol, réduisant modérément leur

²⁰ A noter que la directive propose elle la méthode d'allocation par prorata énergétique

bilan GES. Cela a aussi permis un chiffrage issu d'un cas réel des consommations et émissions de CO₂. Cependant, il est vrai que les écarts qu'introduit la prise en compte de la partie véhicule reposent plutôt sur les autres indicateurs que ceux suivis par les deux études de référence. Sur ces sujets, soulignons la valeur plus élevée d'émission de CO₂ par MJ de diesel dans cette étude par rapport aux deux autres études.

➤ **Première exemple d'analyse des écarts : comparaison de l'étape agricole pour la filière blé**

Une reconstruction des calculs de la directive sur la base des données et de la méthodologie JEC, adaptée en termes de données (les rendements blé pris en compte seraient alors plutôt de 77 qt/ha et non plus de 52 qt/ha de l'étude JEC 2007) et d'allocation (mise en place d'une allocation énergétique de l'amont agricole), a été faite pour l'étape agricole de la filière blé en termes d'émission de CO₂. Les résultats de cette estimation éclairent sur le poids respectif des différentes différences mises en avant précédemment. Il est cependant important de noter qu'il s'agit d'une reconstruction de ces calculs selon les éléments disponibles, et non le calcul exact de l'étude support de la directive. L'utilisation de ces données ne doit pas dépasser le présent cadre de comparaison.

On s'aperçoit sur cet exemple que les deux facteurs principaux expliquant l'écart final sont :

- des émissions initiales plus fortes de N₂O
- réparties sur une quantité de blé par hectare moindre.

L'écart estimé sur l'allocation énergétique mise en place par la directive européenne contribue aussi à cet écart, mais dans une moindre mesure. Les écarts potentiels liés aux inventaires utilisés se compensent globalement pour cette étape et cette filière là.

Tableau 168 – quantification des sources d'écart sur l'étape agricole du blé

Emissions de CO ₂	Estimation type JEC	BIO IS 2009	Ecart	Origine principale de l'écart
Emissions/ha (kg eq CO ₂ /ha)	2 264	2 718	+20%	Emissions N ₂ O 60% plus fortes
Emissions/ tonne de blé (kg eq CO ₂ /t blé)	252	358	+41%	JEC : 52 qt/ha BIO : 77 qt/ha
Emissions/ MJ d'éthanol avant allocation (g eq CO ₂ /MJ éthanol)	33,6	44,5	+42%	Rendements très proches
Emissions/ MJ d'éthanol après allocation (g eq CO ₂ /MJ éthanol)	19,4	28	+47%	Allocation de 57% estimée pour JEC et 62,5 pour BIO

➤ **Second exemple d'analyse des écarts : comparaison de l'étape industrielle pour un EMHV de colza.**

Le tableau suivant est une reconstruction par BIO des données de l'étude ADEME-DIREM, qui peut donc être entaché d'une certaine marge d'erreur.

Il ressort de cette analyse que deux facteurs clés expliquent l'écart de 28% entre les deux études. Le premier réside dans des valeurs d'inventaires plus élevées pour l'étude BIO 2009, du fait d'inventaires ECOINVENT très complets. Le second semble provenir du fait de l'intégration de méthylate de sodium, très coûteux en énergie dans les inventaires ECOINVENT par rapport à une soude par exemple (114 MJf/kg pour le premier, 9,1 MJf/kg pour le second). Les effets des allocations de l'extraction d'huile viennent creuser un peu plus cet écart mais de manière plus marginale.

Tableau 169 – quantification des sources d'écart sur l'étape industrielle du colza

	ADEME DIREM 2002	BIO 2009	% BIO/DIREM	
Données d'entrée énergétiques, étape industrielle (En MJ/ t EMHV)	3745	3473	93%	données d'entrée plus élevée pour ADEME-DIREM
Données Energie Primaire (En MJ/ t EMHV)	4484	5212	116%	inventaires ECOINVENT plus élevés
prise en compte Méthanol	7902	9345	118%	inventaires ECOINVENT plus élevés
prise en compte du méthylate versus soude	7902	9943	126%	pas de méthylate pour ADEME DIREM ?
Total après allocation (En MJ/ t EMHV)	6629	8456	128%	allocation extraction d'huile BIO plus forte (59% contre 46%)
résultat par MJ produit	0,177	0,227	128%	PCI EMHV à 37,4 contre 37,2 pour BIO

10. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Cette étude complète la vision du fonctionnement des filières biocarburants et de leur bilan environnemental. Grâce au travail sur le référentiel 2008, elle cherche à minimiser les points de désaccords possibles entre les différentes visions existantes. Les constats suivants méritent d'être soulignés.

10.1. SYNTHÈSE SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE NON RENOUVELABLE

10.1.1. SUR LE NIVEAU DES ECARTS

L'ensemble des filières biocarburants présentent des bilans plus favorables que leur homologue fossile sur ce point.

Pour l'éthanol de betterave, la consommation d'énergie non renouvelable des éthanolis est inférieure de 52 % à celle d'une essence fossile. Les éthanolis de blé et de maïs présentent des niveaux de réductions proches. Cette réduction atteint plus de 85 % dans le cas de l'éthanol de canne à sucre. La réduction observée pour l'éthanol incorporé sous forme d'ETBE est inférieure à celle de l'éthanol incorporé directement, autour de 20 % par rapport à la filière fossile. Or, l'ETBE reste encore actuellement la forme majeure d'incorporation de l'éthanol dans l'essence en raison de ses facilités de mélange à l'essence fossile. On peut toutefois noter que cette part recule régulièrement depuis 2006. Les simulations des scénarii prospectifs de la situation à 5 ans laissent penser que :

- d'une part, la réduction devrait atteindre une valeur moyenne de 60 % dans quelques années pour les filières françaises,
- d'autre part, l'écart entre filière fossile et ETBE devrait s'améliorer et dépasser les 30% d'ici 2015.

Les esters végétaux (EMHV) présentent des niveaux de réductions de l'ordre de 65 à 78 % par rapport au diesel fossile. L'huile végétale pure offre même une réduction de plus de 80 % par rapport à la consommation d'énergie non renouvelable d'un gazole. Les esters d'huiles usagées (EMHAU) et de graisses animales (EMGA) présentent eux aussi des bilans très intéressants les situant à plus de 80 % de réduction. Il convient cependant de garder à l'esprit pour cette dernière filière que la partie amont de production des graisses animales, assez consommatrice d'énergie, n'est pas intégrée au périmètre retenu, conformément aux recommandations de la Commission Européenne (statut de déchet accordé à ces matières).

Une autre manière de lire ces résultats consiste à regarder les rendements énergétiques. Ceux-ci correspondent à l'énergie contenue dans le carburant rapportée à l'énergie non renouvelable nécessaire à sa production. Ce paramètre illustre plus facilement le transfert entre énergie fossile et énergie issue de ressources renouvelables. Ainsi, plus ce rendement est élevé (et supérieur à 1), plus l'énergie produite pourra venir remplacer des énergies fossiles. Les éthanolis de blé, maïs et betterave présentent des rendements énergétiques autour de 1,7 en incorporation directe, signifiant que pour un MJ d'énergie fossile investie, on arrive à produire 1,7 MJ d'énergie renouvelable. Avec un rendement énergétique autour de 5,5, l'éthanol de canne à sucre présente un transfert de ressource fossile conséquent. Ce rendement énergétique se situe autour de 1 lorsque l'éthanol est incorporé à l'essence sous forme d'ETBE. Mais cela reste supérieur au 0,82 d'une essence. L'utilisation d'environ 0,82 MJ d'essence aura au total consommé 1 MJ de ressources non renouvelables (0,80 MJ pour le diesel).

Avec des rendements énergétiques entre 2,2 pour l'EMHV de colza et 4,2 pour les esters de graisses et huiles usagées, voire 5 pour l'EMHV de palme, les esters se positionnent très bien sur cet indicateur et loin devant le 0,80 MJ/MJf du gazole fossile.

10.1.2. SOURCES ET ETAPES JUSTIFIANT CES ECARTS

Les étapes de transformation industrielle sont les premières à contribuer à cette consommation d'énergie fossile. Cela explique les rendements inférieurs des éthanol, qui nécessitent des étapes de fabrication plus consommatrices en énergie. Viennent ensuite en général les engrais agricoles et la mécanisation, puis les transports, sauf pour les filières d'importation où les transports représentent le second poste. L'étape d'extraction est la plus consommatrice pour les filières fossiles.

Les très bons résultats des filières canne à sucre et palme soulignent un point important sur cet indicateur : cet état n'est pas figé, étant donné que les sources d'énergie utilisées peuvent évoluer. On assiste effectivement à une utilisation plus poussée d'énergie biomasse pour les filières françaises (cf. scénarii prospectifs, pour lesquels cet indicateur est celui évoluant le plus). On peut même imaginer à terme des filières sans consommation d'énergie non renouvelable. **Ce transfert vers d'autres sources d'énergies ne doit pas toutefois occulter le besoin d'avoir des filières produisant le plus d'énergie possible pour chaque unité d'énergie consommée.**

10.1.3. QUEL EST LE NIVEAU DE PRECISION ATTEINT ?

Cet indicateur est considéré comme le plus robuste parmi ceux évalués lors d'une démarche d'ACV : complexité limitée de la mesure de ces consommations, données d'impacts des différentes sources d'énergie disponibles et relativement fiables. Des sources de variabilité existent cependant, associées aux données utilisées (les données des filières d'importation sont moins bien connues que celles collectées auprès des industriels du secteur), les choix d'allocation ou de méthodologie retenus.

En ordre de grandeur, on peut estimer ces résultats fiables à +/- 10% (incertitude généralement évoquée dans une démarche d'ACV)

10.1.4. QUE PEUT-ON EN CONCLURE ?

Les retours énergétiques des esters et des éthanol incorporés directement sont avérés et dépassent des rendements de 2 MJ par MJ investi pour l'ensemble des esters. Ces mêmes bilans montrent aujourd'hui un intérêt existant (l'écart dépasse la variabilité estimée) mais plus limité pour l'éthanol incorporé sous forme d'ETBE par rapport à l'essence fossile, équivalent à des économies d'énergies non renouvelables de l'ordre de 20%.

10.2. SYNTHESE SUR LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

10.2.1. SUR LE NIVEAU DES ECARTS

Sans tenir compte du changement d'affectation des sols, l'ensemble des filières biocarburants présente des bilans moins émissifs que les carburants fossiles. La grande majorité d'entre eux se situent entre 20 et 45 g eq CO₂/ MJ contre 91g et 90 g respectivement pour le diesel et l'essence, soit des réductions entre 50 et 70%.

Sur cet indicateur, les éthanolis sous forme d'ETBE offrent des bilans moins favorables (entre 50g et 66g eq CO₂/MJ), soit des réductions échelonnées entre environ 25% pour l'éthanol de blé et 50% pour l'éthanol de canne à sucre. Ces bilans devraient s'améliorer d'ici 5 ans pour atteindre ou dépasser les 40% de réduction grâce aux efforts d'équipement de chaudières cogérant de la biomasse pour les sites de bioraffinage, et les efforts d'optimisation des industriels de l'ETBE.

Pour la filière biodiesel, les réductions observées sont conséquentes pour l'ensemble des voies (entre 60 et 90 %). Elles sont plus importantes pour les biocarburants à base de déchets (huiles alimentaires usagées, graisses animales) que pour les biocarburants issus des matières premières agricoles. Ceci s'explique principalement par le fait que le statut de déchet conduit à ne pas prendre en compte d'impacts environnementaux avant l'étape de collecte (collecte auprès des usagers d'huiles alimentaires et collecte des graisses animales une fois extraites des autres sous-produits).

La prise en compte du changement d'affectation des sols peut cependant venir modifier ces résultats. Les scénarii imaginés ici montrent que le niveau de cette perturbation peut être relativement élevé et rendre pour les scénarii les plus forts, ces filières plus émettrices que leurs homologues fossiles. Cependant, il reste à poursuivre les travaux de quantification de ces phénomènes et à établir la manière de prendre en compte les diverses responsabilités dans les liens de causalité avant de pouvoir trancher sur cette question.

10.2.2. SOURCES ET ETAPES JUSTIFIANT CES ECARTS

Les émissions des carburants fossiles ont lieu très majoritairement lors de la combustion.

Pour les biocarburants, l'étape agricole est prépondérante, principalement à travers la fabrication des engrais appliqués et les émissions de protoxyde d'azote dans les champs.

Le second poste réside dans l'étape industrielle et ses émissions liées à la combustion d'énergies fossiles.

En affectant toutes les dépenses énergétiques de la réaction de fabrication de l'ETBE à l'éthanol, cette étape représente un niveau d'émission non négligeable pour les éthanolis incorporés sous cette forme.

10.2.3. QUEL EST LE NIVEAU DE PRECISION ATTEINT ?

Le modèle de caractérisation est ici largement consensuel (pouvoir de réchauffement global des gaz) et sert de base à l'ensemble des travaux sur le réchauffement climatique.

Cependant, le poste majeur d'émission dans ces bilans, à savoir le protoxyde d'azote reste encore mal connu (nous estimons à 50% la marge d'incertitude sur ce poste). Des travaux de mesures expérimentales et des modélisations sont en cours pour préciser les variations d'émission selon le type de couvert et de culture. En attendant ces éléments, toute comparaison de valeur absolue des présents résultats en matière de potentiel d'émission de gaz à effet de serre émis n'est pas recommandée si les modalités de prise en compte du protoxyde d'azote et des engrais n'ont pas été harmonisées. En raison de cette incertitude scientifique, cet indicateur n'est probablement fiable *a minima* qu'entre 15 et 25 %. La juste prise en compte des apports d'engrais est aussi un paramètre venant complexifier la modélisation et le niveau retenu d'émission.

Notons aussi que les valeurs d'émission de N₂O ont plutôt été conservatrices dans cette étude, avec l'intégration de l'azote des résidus comme source d'émission de GES comme le préconise le GIEC.

Cela se confirme aussi avec des analyses de sensibilité sur les allocations, qui montre que les valeurs ici proposées se situent probablement dans une gamme haute pour les esters (équivalente à des allocations économiques avec des prix très élevés de l'huile). N'ayant pu pratiquer ce test de l'allocation économique pour les éthanol en raison du nombre d'hypothèses à faire pour la conduire, on peut noter pour les éthanol que les allocations énergétique et massique conduisent à des résultats proches.

Aussi, les bilans des éthanol ici présentés intègrent un effet bénéfique lors de la combustion, qui réduit de quelques grammes leurs bilans. Cet effet véhicule est très lié à la mesure des émissions CO₂ des véhicules et à la mesure de la consommation moteur. Il se devra toutefois d'être confirmé par de plus amples mesures.

Enfin, et dans le cadre d'un élargissement de cette approche attributive à une réflexion plus conséquente, les changements d'affectation des sols peuvent venir modifier grandement ces résultats, voire pourraient potentiellement les inverser pour les bilans des filières d'importation, mais aussi nationales par effets indirects, ce qui ajoute une incertitude complémentaire sur le bilan réel de ces filières.

10.2.4. QUE PEUT-ON EN CONCLURE ?

Hors prise en compte de scénario de changement d'affectation des sols, la réduction du niveau d'émission de gaz à effet de serre se confirme pour l'ensemble des filières, les gains qu'elles présentent étant supérieurs à l'incertitude ou à l'influence des choix méthodologiques.

Même si le niveau exact de réduction est plus délicat à évaluer et dépend de différentes données modélisées, les éthanol incorporés directement et les esters offrent des réductions de l'ordre de 50 % dans la majorité des cas, voire plus pour certaines filières. Les éthanol incorporés sous forme d'ETBE ont des bilans moins marqués mais eux aussi avérés.

Les trois paramètres pilotant ces niveaux restent le rendement agricole à l'hectare, les apports d'engrais et émission N₂O afférentes), ainsi que l'intensité et les sources énergétiques du procédé de transformation.

10.3. SYNTHÈSE SUR LE POTENTIEL D'OXYDATION PHOTOCHIMIQUE

10.3.1. SUR LE NIVEAU DES ECARTS

Avec des niveaux totaux de potentiel d'émissions de 1,5 E-5 kg équivalent d'éthylène par MJ, les biodiesels de végétaux produits sur le sol français semblent légèrement plus émetteurs de molécules à pouvoir oxydant que le carburant fossile de référence (1,1 E-5 kg eq C₂H₄ par MJ). Les autres esters ont des niveaux inférieurs, notamment les huiles usagées et graisses animales car n'utilisant pas d'hexane.

Les éthanol présentent en général des niveaux de potentiel d'impact négatifs, car ils permettent, lors de l'étape de combustion, un gain sur l'ensemble du carburant dans lequel ils sont mélangés et bénéficient ainsi de « l'effet de levier du mélange » lorsque ramené au seul éthanol. L'incorporation sous forme d'ETBE améliore ces bilans. Incorporés dans des carburants à plus forte teneur comme l'E 85, les filières éthanol perdent cet avantage en raison de l'augmentation des émissions d'éthanol

lors de l'étape d'utilisation. Enfin on peut rappeler la particularité des filières actuelles de canne à sucre avec des bilans de loin moins bons que ceux de l'essence fossile.

10.3.2. SOURCES ET ETAPES JUSTIFIANT CES ECARTS

Le bilan d'un B10 de colza est lié à 70% aux émissions d'hexane utilisé dans le procédé d'extraction de l'huile. L'étape agricole contribue dans une moindre mesure, à travers la fabrication des engrais. Les transports jouent un rôle assez marqué pour les filières d'importation comme le soja, en augmentant la part des flux liés à la combustion (hydrocarbures, COV, SOx).

Pour les éthanol, la réduction qu'apportent les mélanges E10 sur le carburant E0 provient principalement de la réduction du monoxyde de carbone lors de l'étape véhicule. En modifiant la composition des COV émis lors de la combustion (plus d'émissions d'éthanol au détriment de COV non spécifiés), l'E10 apporterait aussi un gain par rapport à l'E0 du fait d'un pouvoir oxydant estimé plus faible pour l'éthanol que pour les COV non spécifiés (moyenne des pouvoirs oxydants des COV). Mais la valeur faible de ce gain et la limite méthodologique d'une valeur de photo-oxydation moyenne attribuée au COV moyen appellent à la prudence sur ce second aspect.

Pour l'E85, l'augmentation du niveau des émissions de COVNM (notamment des vapeurs d'éthanol) lors de l'étape véhicule explique le renversement de tendance. Enfin, la filière Canne à sucre est pénalisée par le brûlis des résidus de culture, fort émetteur de monoxyde de carbone.

10.3.3. QUEL EST LE NIVEAU DE PRECISION ATTEINT ?

Les causes d'imprécision sur cet indicateur sont de 3 ordres :

- Le modèle de caractérisation utilisé (ici CML à travers le Potentiel d'Oxydation Photochimique POCP) et donc l'impact oxydant des molécules. Même si plus simple et robuste que pour la mesure de toxicité humaine, d'autres systèmes de mesure existent et proposent des valeurs différentes. Les valeurs attribuées aux oxydes d'azote peuvent notamment faire varier les bilans fortement (ils ne sont pas directement pris en compte par CML), ainsi que les SOx (non pris en compte dans d'autres méthodes), voire la valeur d'oxydation attribuée au monoxyde de carbone qui on l'a vu, présiderait au bilan des éthanol.
- Les données d'entrée, le registre des polluants utilisés pour les filières fossiles notamment ne semblant pas encore assez homogène pour apporter une haute fiabilité sur le niveau d'émission considéré.
- Les valeurs tendancielle d'émission véhicule choisies jouent un rôle fort pour les éthanol, alors que les émissions réelles de chaque véhicule peuvent être très différentes selon les stratégies des constructeurs, le type et l'âge des véhicules.

Compte tenu de ces éléments, une position prudente consiste à imaginer des écarts de l'ordre de 30% à 50% entre filières comparées pour prétendre voir une réelle différence. Une manière d'éviter les problèmes de la mesure des pouvoirs oxydants peut être de raisonner molécules émises par molécules émises. Mais cela rend difficile une vue d'ensemble.

10.3.4. QUE PEUT-ON EN CONCLURE ?

L'écart est assez peu marqué dans le cas des esters, l'analyse de sensibilité pratiquée avec une simulation de baisse de 33 % du niveau d'émission des sites d'estérification suffit à rapprocher la valeur de ces filières de la valeur du diesel fossile. Avec un niveau d'émission COV utilisé ici dépassant la norme actuelle des 1 mg de COV / kg d'huile, et des normes allant vers la réduction des émissions de COV, **il est probable que le constat à dresser ici soit plus celui d'une équivalence sur cet indicateur entre esters et diesel fossile.**

Pour les éthanol, la réduction estimée à 25 % du niveau d'émission de monoxyde de carbone à l'échappement avec des carburants contenant des oxygénés est à l'origine de cette baisse. Cette réduction de 8% pour un km parcouru avec un E10 est faible au niveau du carburant réel, mais signifie un gain élevé lorsque ramené aux 10% en volume d'éthanol dans le mélange. **Ce premier bilan donne une tendance qu'il sera nécessaire de confirmer.** La connaissance fine de l'ensemble des molécules émises à l'échappement, ainsi que leurs facteurs d'oxydation respectifs, et ce notamment au niveau de l'éthanol et du reste des COV émis, apporterait les confirmations nécessaires à ces résultats.

Il faut aussi garder à l'esprit que l'incorporation d'un sixième d'éthanol provenant de cultures utilisant le brûlis compenserait ces quelques pourcents de bénéfices. En effet, les filières utilisant le brûlis présentent des bilans indéniablement plus défavorables que les filières fossiles par des niveaux d'émission de monoxyde de carbone très élevés.

10.4. SYNTHÈSE SUR LE POTENTIEL DE TOXICITÉ HUMAINE

10.4.1. SUR LE NIVEAU DES ÉCARTS

Pour les esters, les bilans présentent des valeurs négatives sur ce potentiel de toxicité. L'effet de levier de la phase véhicule joue ici pour expliquer cette valeur.

Ce potentiel de toxicité pour les éthanol et les essences est plus faible que pour les diesels, les émissions véhicules étant moins pénalisantes. Pour les éthanol, l'indicateur présente un niveau positif supérieur à celui de l'essence fossile de référence (deux fois supérieur pour le blé, et 50% plus fort pour la betterave). L'étape agricole en est le contributeur principal, suivie à un niveau proche par la phase véhicule.

Lorsque incorporés sous forme d'ETBE, le bilan des éthanol présente une amélioration partielle sur cet indicateur, les produits fossiles composant l'ETBE avec l'éthanol bénéficiant d'inventaires d'émissions plus faibles pour leur fabrication (cf. effet de levier).

10.4.2. SOURCES ET ÉTAPES JUSTIFIANT CES ÉCARTS

Pour les esters, la phase véhicule est prépondérante et présente une valeur négative. La phase agricole vient ensuite, dont les émissions sont estimées vingt fois plus faibles que les gains de la phase véhicule. L'étape de transport arrive en dernier, sauf pour les filières d'importation où elle dépasse la contribution de l'étape industrielle. On s'aperçoit que la réduction d'émission d'hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP) de 25% pour un B10 impacte le plus fortement cet indicateur de potentiel de toxicité. C'est ce poste qui positionne quasiment à lui seul l'écart entre la

filière fossile et les filières de biodiesel sur cette catégorie d'impact, et ce en raison d'un facteur de caractérisation du risque très fort dans CML Pour les HAP.

Pour les éthanol, l'étape agricole en est le contributeur principal, avec les apports de pesticides puis d'éléments traces métalliques via les engrais, suivi à un niveau proche par la phase véhicule et les très faibles émissions de HAP attribuées à l'éthanol. L'E10 ne diminuant pas a priori le niveau d'émission de HAP, l'éthanol est considéré émettre autant qu'un E0.

10.4.3. QUEL EST LE NIVEAU DE PRECISION ATTEINT ?

Cet indicateur est celui présentant le plus d'incertitude actuellement : les facteurs de caractérisation à améliorer et l'impact fort de postes ayant un niveau de quantification et de modélisation moins fiables doivent rendre précautionneux le lecteur. Un facteur 10, voire 100, est en général appliqué pour savoir si les écarts commencent à être significatifs.

De plus, comme pour tous les indicateurs où l'étape véhicule contribue fortement, la validation des tendances ici utilisées sur une échelle plus large est nécessaire pour confirmer les effets moyens simulés.

10.4.4. QUE PEUT-ON EN CONCLURE ?

En réduisant les émissions de HAP, les biodiesels semblent présenter un avantage par rapport au carburant fossile suffisamment intéressant pour contrebalancer les effets sur la santé des apports de phytosanitaires. Cependant, et malgré le facteur 30 qui existe entre impact favorable des HAP et impact défavorable des pesticides, il convient toutefois d'être prudent sur ce constat, le facteur d'impact des HAP et des pesticides pouvant évoluer de plusieurs unités avec les connaissances ou le type de modélisation.

Du côté des éthanol, cet effet n'existant qu'à des taux de mélange assez élevés, ces filières ne bénéficient pas d'un effet compensant les apports de produits phytosanitaires. C'est le premier poste majeur différenciant les éthanol des filières fossiles sur cet indicateur. Il place ainsi les bilans des éthanol consommés en France à des niveaux plus élevés de potentiel d'impact sur la santé humaine que la filière essence française.

Un calcul permet cependant de mettre en perspective l'importance de cet écart de toxicité supposé entre E10 et E0 par exemple : pour l'E10 d'éthanol de blé, ce différentiel sur 10 000 km équivaldrait en « équivalent toxique » à 69 µg de HAP, soit les émissions de HAP du véhicule diesel modélisé (Clio II sans FAP, EURO4) sur 77 km.

10.5. SYNTHÈSE SUR LE POTENTIEL D'EUTROPHISATION

10.5.1. SUR LE NIVEAU DES ECARTS

Avec des niveaux 10 fois plus élevés que les carburants fossiles, aussi bien pour les éthanol que pour les esters, les biocarburants présentent des bilans défavorables pour cet indicateur. Une fois transformé sous forme d'ETBE, le MJ d'éthanol montre un léger gain par rapport à l'incorporation sous forme brute mais qui est loin de contrebalancer la tendance globale.

10.5.2. SOURCES ET ETAPES JUSTIFIANT CES ECARTS

L'étape agricole est de loin la plus contributrice. Le lessivage des nitrates en est la cause première. Les émissions d'ammoniac vers l'air en raison des apports d'engrais a une contribution de près de 20% de cette étape. Soulignons que la légère augmentation des émissions de NOx lors de la combustion en véhicule (+3%) est infime comparée aux lessivages en champ.

Les éthanol présentent une répartition des émissions marquée par l'étape industrielle. Cela tient au niveau d'émission modélisé pour l'étape industrielle (notamment la DCO : 0,04 kg DCO/kg éthanol contre 0,0018 kg DCO/kg EMHV). Cela est lié au traitement d'un nombre plus important d'effluents en éthanolerie, avec notamment les résidus (condensats,...) du traitement des vinasses.

10.5.3. QUEL EST LE NIVEAU DE PRECISION ATTEINT ?

Ce calcul mesure un potentiel d'eutrophisation des molécules émises. Ces potentiels sont eux-mêmes calculés avec une approche assez simple de ce phénomène (toute molécule contribue à l'eutrophisation à hauteur de son nombre d'azote et de phosphore). Apporter un jugement plus poussé sur le risque réel que présentent des écarts ainsi mesurés nécessiterait alors de rentrer dans le détail du phénomène d'eutrophisation et d'y injecter des paramètres de localisation géographique (une même molécule n'a pas le même effet selon le milieu, l'époque pendant laquelle elle est émise, ...), ce qui sort du cadre de cette étude.

Une fois ce modèle accepté pour quantifier des risques d'eutrophisation, la source d'incertitude principale réside dans les données d'entrée (quels niveaux de lessivage des nitrates et phosphates ?). L'imprécision sur ces données confère au résultat une imprécision globale de +/- 20% (cf. l'analyse de sensibilité conduite)

10.5.4. QUE PEUT-ON EN CONCLURE ?

L'impact sur l'eutrophisation est indéniablement en défaveur des filières biocarburants. Après avoir testé des hypothèses avec un lessivage des nitrates réduit à 0 unités par an, il est constaté que l'étape agricole pèsera toujours de manière prépondérante sur ces bilans à travers les émissions d'ammoniac ou de NOx lors de l'épandage.

10.6. CONCLUSION GENERALE : PERSPECTIVES

10.6.1. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ETUDES

Le travail comparatif ici réalisé montre que les résultats obtenus avec cette étude sont en cohérence avec d'autres études précédentes en termes de gain par rapport aux filières fossiles (étude JEC 2007 et ADEME-DIREM 2002).

Cela est obtenu malgré une méthodologie spécifique (selon le référentiel de 2008) et des inventaires différents. Les ordres de grandeurs sont maintenus ainsi que les écarts déjà estimés entre filières.

Il se dessine ainsi des réductions en matière d'énergie non renouvelable consommée et de gaz à effet de serre émis pour l'ensemble des biocarburants étudiés, réductions qui devraient progresser dans les prochaines années avec le développement de la cogénération biomasse sur ces sites.

Ces réductions peuvent être importantes pour certaines filières comme les esters ou les éthanols en incorporation directe, plus limitées mais avérées lors de l'incorporation des éthanols sous forme d'ETBE.

10.6.2. SPECIFICITES DE CETTE ETUDE

La partie utilisation du carburant permet à cette étude de compléter utilement la vision détaillée qui existait de l'amont par une compréhension plus fine des effets véhicules. Les effets attendus sur les modifications de polluants ont été quantifiés. Un effet de réduction légère des émissions de CO₂ des oxygénés est à souligner car venant peser favorablement dans le bilan des éthanols, tout comme la réduction du niveau d'émission des hydrocarbures aromatiques polycyclique (HAP) par l'introduction de biodiesel qui confère ainsi un bilan du « champ à la roue » favorable pour les esters. De même, la réduction des émissions de monoxyde de carbone lors de la combustion contribue à un bilan en faveur des éthanols sur l'ensemble de l'indicateur « oxydation photochimique ».

Une lecture globale des résultats sur les trois indicateurs de santé humaine et d'eutrophisation reste difficile du fait d'impacts environnementaux plus complexes et donc très dépendante des choix des modèles de caractérisation utilisés. Les grandes tendances attendues se confirment (poids fort du poste phytosanitaire, du lessivage d'azote), mais d'autres points de réflexion apparaissent (rôle d'autres polluants dans les bilans de santé humaine comme les HAP, les émissions de CO) et sont autant de pistes à confirmer plus avant.

10.6.3. PISTES DE TRAVAIL A POURSUIVRE

La présente étude réaffirme les pistes de travail concernant l'amélioration de ces bilans, et notamment la nécessité de poursuivre des travaux sur la toxicité des HAP, des produits phytosanitaires, ou bien entendu, sur la connaissance et la limitation des déboisements. Ceux-ci sont autant d'éléments qui permettront d'affiner ces résultats.

Un travail de validation des données et tendances au niveau des émissions véhicule est aussi nécessaire dans la mesure où cette étape peut jouer un rôle non négligeable sur plusieurs indicateurs (GES pour les éthanols, potentiel de toxicité ou photo-oxydation). Les stratégies des constructeurs, qui sont potentiellement différentes selon les couples moteur-véhicule, doivent être approfondies pour asseoir des tendances sur un nombre plus important de données. Les choix méthodologiques qui peuvent en découler seront eux aussi à expertiser. Comment et à qui attribuer un gain de fonctionnement moteur si grâce à un biocarburant et à une baisse des émissions de telle molécule, un constructeur peut améliorer l'optimisation de son moteur sur un paramètre en maintenant des niveaux d'émission proches de la norme ? et inversement ?

Une des pistes intéressantes réside aussi dans le travail commencé sur les questions d'incorporation. Quel effet a l'incorporation de produits oxygénés en quantités non négligeables sur la marche des raffineries pétrolières ? Quel effet sur les émissions véhicule possède ce changement de formulation des bases, notamment essences ? En modifiant l'équilibre de fonctionnement de la raffinerie et les spécifications du carburant fossile autorisant le mélange, on néglige peut-être une modification indirecte d'émission.

Il faut donc considérer ces résultats comme une quantification susceptible de pouvoir évoluer dans le temps avec l'amélioration des connaissances.

10.6.4. LES CHANGEMENTS D’AFFECTATION DES SOLS

Les effets observés au travers des simulations peuvent être très pénalisants, tant pour les biocarburants d’importation que pour les biocarburants produits à partir de ressources agricoles produites en France, **s’il est montré qu’il faut attribuer aux biocarburants des impacts au niveau de la valeur haute calculée dans l’étude sur des scénarii théoriques**. La filière soja est potentiellement la plus impactée du fait de rendement à l’hectare plus faible, et malgré la production de tourteaux. Des scénarii plus modérés de changement d’affectation des sols permettraient de laisser un gain par rapport aux filières fossiles pour la grande majorité des filières.

Cette étude n’a pas prétendu trancher les questions méthodologiques et quantitatives de la place des biocarburants dans la déforestation des dernières années et encore en cours. Les calculs proposés restent grossiers et ne visaient qu’à donner un ordre d’idée potentiel des effets que pourraient prendre ces éléments dans les bilans en balayant des scénarios très contrastés. Des travaux spécifiques doivent être conduits pour approfondir cette zone d’ombre et le degré de plausibilité des scénarios vis-à-vis des différentes filières étudiées.

Il serait donc nécessaire de lever cette incertitude qui plane au dessus de l’intérêt environnemental des biocarburants européens par rapport aux événements à l’échelle de la planète par des travaux approfondis et dépassionnés. Les mécanismes de transmission indirecte sont notamment à analyser à l’aune de modèles et de données économiques plus poussés afin de comprendre les transmissions entre marchés.

10.6.5. SUR L’UTILISATION DE CETTE ETUDE

Le présent rapport s’est appuyé sur un référentiel commun et débattu pour élaborer ce bilan environnemental. Il réduit par là les sujets de débat sur la validité de ces résultats, sans pour autant prétendre apporter une réponse définitive sur l’ensemble des questions méthodologiques.

En effet, les éléments de comparaison proposés dans la partie d’analyse illustrent l’extrême sensibilité des résultats à différents paramètres comme les émissions de N₂O, le changement d’affectation des sols, ou le choix des inventaires. Ces éléments peuvent modifier significativement les niveaux d’impacts évalués.

Ce constat ne doit cependant pas signifier que tout résultat sur le sujet est inexploitable. Les analyses de sensibilité permettent de circonscrire ces éléments de doute. Une des orientations de ce travail a résidé dans la transparence et la pédagogie à donner à ces quantifications, d’où les travaux poussés d’analyse et de mise en perspective, qui loin de chercher à relativiser les résultats, visent à leur donner un cadre et un contexte permettant leur bonne utilisation.